EL NÚCLEO ATÓMICO

RUTHERFORD

Los átomos también tienen corazón



NATIONAL GEOGRAPHIC

ERNEST RUTHERFORD es el científico que demostró la existencia del núcleo atómico, al que definió como una «mosca» en el interior de la «catedral» del átomo. A pesar de su ínfimo tamaño, el núcleo concentra la mayor parte de la masa atómica y, por tanto, de la energía. Considerado el mejor experimentador de su época, estableció un método para determinar la antigüedad de la Tierra basándose en la radiactividad, a la sazón esa otra gran desconocida, cuyo estudio le valió el premio Nobel de Química en 1908. Logró asimismo la primera transmutación artificial de un elemento en otro, haciendo de esta forma realidad la aspiración milenaria de la alquimia. A su muerte, el «cocodrilo», como era conocido entre sus colegas y alumnos en alusión a la fuerza de su carácter, fue enterrado en la abadía de Westminster: un neozelandés descansa junto a los grandes de la ciencia inglesa.

EL NÚCLEO ATÓMICO

RUTHERFORD

Los átomos también tienen corazón

NATIONAL GEOGRAPHIC

ROGER CORCHO ORRIT es escritor y divulgador. Escribe sobre ciencia en medios escritos generalistas y en revistas especializadas. Es autor de diversos libros de texto y ha desarrollado parte de su carrera profesional en el mundo editorial.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Album: 57a; The American Institute of Physics: 38; Archivo RBA: 26, 28, 37ad, 55, 57bi, 58, 65, 76, 79, 84, 92, 97ai, 99, 134, 139; Biblioteca del Congreso de Estados Unidos: 37ai; Biblioteca Nacional de Francia: 34, 137a; Corbis: 37b, 97b, 137b; Getty Images: 43; GF Hund: 24; The Nobel Foundation: 57bd, 115; Radagasty: 123; Smithsonian Institution Libraries: 51, 97ad.

ISBN: 978-84-473-7646-9
Depósito legal: B-9890-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

«Todas las cosas están compuestas por átomos.» Esta sería, a tenor del físico estadounidense Richard Feynman, la tesis más importante de la historia de la física, aquella que valdría la pena conservar en caso de que una catástrofe hiciera olvidar todos los conocimientos adquiridos hasta la actualidad.

Los átomos se pueden considerar las piezas de las que está hecha la realidad. O bien se encuentran aislados, o se enlazan entre sí formando moléculas o estructuras cristalinas, o se fusionan los núcleos atómicos, dando lugar a átomos más grandes, como ocurre en el interior de las estrellas. Como resultado de esta variedad existe el universo tal y como lo conocemos. Ya en los albores de la civilización occidental, un filósofo griego se atrevió a afirmar que en el universo solo hay átomos y vacío. Se trataba de Leucipo de Mileto (siglo v a.C.). Pero no fue hasta principios del siglo xx cuando físicos como Ernest Rutherford fueron capaces de mostrarnos en qué consiste la materia.

Los átomos tienen un tamaño minúsculo. Para poder expresar su tamaño es necesario recurrir a una unidad de medida llamada angstrom. Un angstrom es 10^{-10} m, es decir, un centímetro dividido en cien millones de partes; el átomo tendría un tamaño del orden de una de esas porciones. Los físicos del siglo xx enseñaron que el átomo no era indivisible, sino que tiene una estructura interna formada por elementos más pequeños, partículas

subatómicas como protones, neutrones y electrones. Hoy día se considera que la materia puede describirse como formada por un conjunto de partículas (agrupadas bajo el nombre de fermiones), entre las que se distinguen dos tipos básicos: los quarks y los leptones. Estos, a su vez, incluyen diversos subtipos con propiedades diferenciadoras y, en general, solo ciertas combinaciones de ellos conforman la materia tal como la conocemos. Esta hipótesis se denomina «modelo estándar de física de partículas» e incluye la comprensión de las fuerzas e interacciones fundamentales entre las partículas, lo que permite explicar la formación, desintegración o variedad de los átomos.

Sobre la base de esta realidad granular, es todo un desafío explicar cómo un gran número de partículas encajan unas con otras como engranajes perfectos. Se ha estimado que el universo se compone de 10^{78} átomos (¡un 1 seguido de 78 ceros!); por su parte, el cuerpo de un solo ser humano alberga 10^{27} átomos, en su mayoría de oxígeno, carbono e hidrógeno, que forman células que se renuevan casi por completo en ciclos de cinco años.

Ahora bien, si todo está hecho de átomos, ¿estudiarlos nos puede dar la clave para comprender todo el universo? Así lo señala enfáticamente el físico neerlandés Martinus Veltman: «Conocerlo todo sobre la física de partículas elementales significa conocerlo todo sobre todo». Aunque Veltman se refiere con ello a una vision parcial del «todo», gracias al estudio de los átomos se ha conseguido enunciar científicamente el origen y la evolución del universo; descubrir cómo con el Big Bang se formaron primero agregados de quarks, para constituir, por ejemplo, núcleos de deuterio y helio, que se combinarían luego con electrones para formar átomos. Densificaciones de materia y energía formarían las estrellas, las galaxias, etc., y en ellas, los procesos que conducen a la formacion de átomos más masivos y sus combinaciones, hasta ese grado sumo de complejidad que es la vida.

Históricamente, el átomo constituyó un límite arbitrario al que se tenía que circunscribir la curiosidad humana. Los átomos eran partículas indivisibles, como unidades básicas semejantes a los axiomas euclídeos de la geometría. Nuestra limitación a la hora de conocerlos en profundidad se asemeja a la dificultad con

la que nos encontramos al intentar comprender la inmensidad del universo.

Darse cuenta de que el universo no se acaba donde se pensaba en la Antigüedad y comprender que los átomos no son la mínima unidad constituyente de la materia han sido algunos de los hitos decisivos en la historia de la ciencia, en especial de los últimos dos siglos.

¿Cómo estudiar los átomos? Por mucho que todo lo que percibimos como materia esté constituido por átomos, su tamaño minúsculo hizo que durante siglos se polemizara incluso sobre la posibilidad de su existencia. A principios del siglo XX, los físicos se encontraban ante el átomo como los seis sabios ciegos de la India ante un elefante: uno palpaba la trompa, otro el costado, otro los colmillos, otro las patas, otro la cola y otro las orejas, y cada uno concebía una realidad con fenómenos radicalmente diferentes. Desde frentes distintos, ya fueran la radiación, el movimiento browniano, o los espectros de absorción y de emisión, se tenían indicios sobre su existencia, pero siempre era de forma indirecta, de tal modo que para muchos científicos la hipótesis atómica resultaba incluso metafísica o, expresándolo de otro modo, palabrería.

Ernest Rutherford, hombre corpulento y amante del rugby, fue el físico que logró descerrajar la caja fuerte que hasta ese momento había constituido el átomo para, efectivamente, llegar a conocer su interior. Esta es una de las razones por las que está considerado como el físico experimental más importante del siglo XX. Gracias a su metodología y a sus técnicas de investigación, pudo conocer la estructura fundamental que comparten todos los átomos. Para ello se sirvió de unos medios sencillos y elegantes. En la actualidad, por ejemplo, usamos sofisticados aceleradores de partículas y avanzados detectores para estudiar los elementos todavía mucho más fundamentales de la materia mediante colisiones, de forma extremadamente controlada y precisa. Rutherford no contaba con nada parecido ni remotamente. Aun así, descubrió que el interior de los átomos contenía una estructura todavía más minúscula, de un tamaño con relación a aquel semejante al de una mosca en una catedral, o a la cabeza de un alfiler en un estadio de

fútbol, y le puso el nombre de «núcleo». Con este descubrimiento se dio cuenta de la siguiente paradoja: en el núcleo estaba contenida casi toda la masa del átomo. Solo los electrones cruzaban el inmenso vacío que constituye el átomo. Dar con el núcleo fue, por su trascendencia, un acontecimiento históricamente comparable al descubrimiento de América o a pisar la Luna por primera vez.

Este físico neozelandés demostró también que sobre el átomo se ignoraba todo, que se trataba de un vasto territorio que merecía la pena explorar. No era el final del camino, sino más bien un punto de acceso a un mundo que más tarde se descubriría que sigue leyes absolutamente diferentes a las que podemos observar de forma cotidiana. Las piezas empezaron a encajar gracias a la contribución de otros físicos, empezando por el danés Niels Bohr. El átomo dejó de entenderse entonces de forma clásica para pasar a formar parte, definitivamente, del extraordinario y enigmático mundo cuántico.

Pero Rutherford no solo consiguió descubrir un universo entero en cada uno de los átomos, sino que además logró lo que parecía un sueño de locos: transmutar un elemento en otro. La transmutación era una antigua aspiración medieval alrededor de la cual se había desarrollado la alquimia. Tomar latón para convertirlo en oro no era más que un timo del doblador de cucharas de turno, hasta que llegó Rutherford para demostrar que la transmutación química era en realidad un fenómeno físico que podía darse de forma natural y que también podía provocarse artificialmente.

La transmutación ponía en evidencia, por encima de todo, que en los átomos reinaba un orden y que estaban hermanados. Los elementos (hierro, oro, oxígeno, etc.) no eran categorías ajenas entre sí e incompatibles. A pesar de las diferencias, había extraordinarias similitudes que permitían convertir un átomo de un elemento en otro. De la misma manera que Darwin hizo patente que los seres vivos tienen un ascendente común, los átomos derivan todos ellos del hidrógeno. La transmutación sugería además que el núcleo se podía fragmentar y dividir en dos mitades. Para Rutherford, este proceso —llamado fisión y que sería formalizado por Otto Hahn, físico que trabajó a las órdenes de Rutherford, y Lise Meitner— era casi irrelevante y apenas desataría energía. Sin em-

bargo, como expresa la conocida ecuación de Einstein ($E=mc^2$), existe una relación directa entre la masa y la energía que puede dar una idea de los fenómenos energéticos que comprenden cambios en la masa y en la estructura íntima de la materia.

El premio Nobel concedido a Rutherford en 1908, que para su sorpresa fue el de Química, se debió a «sus investigaciones en la desintegración de los elementos, y la química de las sustancias radiactivas». Fue uno de los muchos honores con los que se reconoció su labor. Rutherford también fue capaz de distinguir entre radiaciones alfa, beta y gamma. Estas radiaciones son un fenómeno que solo se comprendió tras algunas casualidades. En sus investigaciones, el nombre de Rutherford estuvo a la altura de otros físicos eminentes de la época, como los Curie o Antoine Henri Becquerel.

Rutherford fue un físico experimental, amante del trabajo de laboratorio y reacio a los modelos puramente teóricos, alérgico a las dificultades matemáticas. Era una persona disciplinada, metódica, con capacidad para relacionar conceptos y fenómenos. Determinó, por ejemplo, la edad de la Tierra por primera vez gracias a la radiactividad. La radiactividad daba la pista en una cuestión geológica ciertamente fundamental y respecto a la cual no existía acuerdo.

Rutherford formó parte de una generación de científicos que trabajaba en solitario o bien en equipos de pocos miembros. Además, era una personalidad con capacidad de atraer el talento y de inspirar a los investigadores que tenía a su alrededor, lo cual explica que once de sus colaboradores fueran reconocidos con el premio Nobel. Su valioso y cuantioso trabajo motivó decisivamente a las siguientes generaciones para que se vieran obligadas a trabajar en equipos cada vez más grandes, desarrollando su labor en colaboraciones, con frecuencia internacionales, y que necesitaban de mayores inversiones, infraestructuras e instalaciones. Todo ello sitúa a Ernest Rutherford en una posición histórica clave: sus contribuciones no solo aportaron nuevos datos y conocimientos, sino que además hicieron entender la labor del científico de una manera nueva.

1871 Ernest Rutherford nace en Nelson, Nueva Zelanda, el 30 de agosto.

1889 Inicia sus estudios en la Universidad de Canterbury, gracias a una beca.

1894 Experimenta con ondas de radio y desarrolla la telegrafía sin hilos.

1895 Se convierte en ayudante del científico J.J. Thomson en el laboratorio Cavendish de Cambridge. Estudia los rayos X y posteriormente la radiación descubierta por Henri Becquerel.

1898 Logra una plaza en la Universidad McGill (Montreal, Canadá). Consigue medir los rayos alfa y beta.

1900 Rutherford contrae matrimonio con Mary Newton. Al año siguiente nace Eileen, su única hija.

1902 Junto a Frederick Soddy publica la teoría de la desintegración radiactiva, con la que es capaz de explicar fenómenos como las emanaciones del torio o las curvas de desintegración.

1904 Publica *Radiactivity*, su primer libro y el primero que establece las bases de esta nueva rama de la física. Hace una estimación de la edad de la Tierra.

1907 Es nombrado profesor en la Universidad de Mánchester. Junto con Hans Geiger, diseña un detector de partículas alfa. Logra identificar las partículas alfa con núcleos de helio.

1908 Recibe el premio Nobel de Química.

1910 Enuncia un modelo atómico cuyo núcleo concentra casi toda la masa del átomo.

1913 Publica *Sustancias radiactivas y sus radiaciones*.

1915 Inicia sus estudios sobre detección de submarinos que contribuirán al desarrollo del sónar.

1917 Logra la primera desintegración atómica inducida de la materia convirtiendo el nitrógeno en oxígeno.

1919 Es nombrado director del laboratorio Cavendish y profesor en la Universidad de Cambridge.

1920 Predice la existencia del neutrón.

1925 Alcanza la presidencia de la Royal Society de Londres.

1930 Fallece su hija Eileen al dar a luz su cuarto hijo.

1932 En el laboratorio Cavendish, James Chadwick anuncia el descubrimiento del neutrón. Ernest Walton y John Cockcroft hacen público que su acelerador de partículas ha desintegrado el núcleo de un átomo.

1937 Muere en Cambridge el 19 de octubre, por la complicación de una hernia umbilical parcialmente estrangulada.

CAPÍTULO 1

El descubrimiento del núcleo atómico

El descubrimiento del núcleo del átomo fue un momento memorable de la historia de la física. A Rutherford le sirvió para proponer un nuevo modelo atómico que guardaba un gran parecido estructural con el de un sistema planetario en miniatura, con los protones en el núcleo y los electrones girando a su alrededor, describiendo órbitas fijas. Se trataba, sin embargo, de una concepción atómica insostenible, como muy bien supo apreciar posteriormente el propio autor.

«Cocodrilo». Ese era el sobrenombre con el que los estudiantes conocían a Ernest Rutherford cuando ya era un científico venerable y respetado. Un alumno soviético, Pyotr Kapitsa, le puso ese mote porque el cocodrilo representa para los rusos la figura paterna. Pero también había otro sentido cariñosamente malévolo en esa caracterización: el cocodrilo no puede torcer el cuello, se ve obligado a mirar siempre al frente, sin flexibilidad de ninguna clase. Rutherford tenía un carácter fuerte, y su mayor obsesión eran los datos y las evidencias. Uno de sus gritos de guerra era: «¡Dame datos, y dámelos cuanto antes!». No solo los estudiantes fueron testimonios de esa férrea exigencia. Cuando se contrató a un obrero para levantar una pared en el laboratorio, más de una vez tuvo que detenerse asombrado al ver a Rutherford gritándole que quería ver el resultado de su trabajo de investigación inmediatamente, al confundirlo con un científico.

Sin lugar a dudas, esa pasión por las pruebas convirtió a Rutherford en el mejor experimentador de su generación y en uno de los científicos más destacados de todos los tiempos. Sus aportaciones son el fruto del trabajo de calidad llevado a cabo a lo largo de tres décadas, y las más importantes llegaron una vez que ya estuvo en posesión del premio Nobel. Fue, además, mentor de varias generaciones de físicos que luego brillaron con luz propia, a los que supo estimular y encaminar para que tuvieran carreras exitosas.

EL EXPERIMENTO DE RUTHERFORD

Entre los muchos descubrimientos de Rutherford destaca el del núcleo atómico. A finales de 1910, Rutherford manifestó a amigos y conocidos la noticia: «Ya sé cómo son los átomos». No era una mera ocurrencia. Llevaba casi dos años reflexionando sobre un curioso fenómeno observado en un experimento con el que aspiraba a comprender la estructura de los átomos. El momento del eureka llegó cuando se dio cuenta de que el átomo debía tener una estructura interna a la que se llamó *núcleo*. Y el núcleo debía ser una característica común a los átomos, a todos los elementos.

Años más tarde culminó este trabajo al ser capaz de identificar el protón, la partícula de carga positiva que forma parte del núcleo. A principios del siglo XX, cuando apenas empezaba a existir un cierto consenso en torno a la propia existencia de los átomos, Rutherford fue capaz de desentrañar su estructura interna.

Remontémonos a mayo de 1909. Rutherford había recibido recientemente el premio Nobel de Química, y dirigía los laboratorios de la Universidad de Mánchester, unos de los más prestigiosos del mundo. En ese momento, Hans Geiger —el inventor del contador de partículas radiactivas que lleva su nombre y profesor de técnicas para medir radiactividad— informó a Rutherford de que había un joven estudiante que parecía tener las aptitudes para enfrentarse a la experimentación. Rutherford repuso: «Mira si puede obtener algún efecto de partículas alfa reflejadas directamente de una superficie metálica».

Rutherford no tenía depositadas muchas esperanzas en dicho experimento, pero era necesario realizarlo como descarte (un procedimiento que siempre le reportó grandes éxitos). En realidad, Rutherford propuso al alumno un tipo de experimentos semejante al que ya había estado realizando desde su llegada al laboratorio en 1907. Un año antes, él mismo había probado lanzar rayos alfa a través de un mineral llamado mica, y gracias a esos experimentos conocía que los rayos alfa se desviaban ligeramente de su trayectoria. Lo que ignoraba era por qué se desviaban.

Ernest Marsden fue el estudiante que se puso manos a la obra logrando diseñar, con la supervisión de Geiger, el que vendría a ser un experimento sencillo, elegante y que condujo a un hallazgo que lo sitúa entre los más extraordinarios de la historia de la física.

> «Al hallar cómo está construido el núcleo de los átomos encontramos uno de los más grandes secretos que existen, si exceptuamos el de la vida.»
>
> — Ernest Rutherford.

El experimento consistía en enviar partículas alfa —partículas surgidas de procesos radiactivos que posteriormente se supo que son núcleos de helio— a través de una lámina de metal en una cámara de vacío. Rutherford y Geiger habían observado que se producían desviaciones de tipo aleatorio cuando los rayos atravesaban el metal. Se escogieron láminas de oro muy delgadas, de modo que las partículas alfa no fueran completamente absorbidas por el metal y así poder estudiar la interacción mediante transmisión.

Rutherford no había escogido las partículas alfa por casualidad. Sus estudios sobre radiactividad le habían conducido al Nobel en los años previos. Ahora las partículas alfa ya no eran su objeto de estudio, sino un instrumento para estudiar el interior de los átomos, como si se tratara de la clave que ayudara a desentrañar los constituyentes de la materia.

Más allá de la finísima lámina de oro se colocaba una superficie con sulfuro de cinc, a modo de detector. Esta sustancia se caracteriza por emitir una luz fluorescente con el impacto de partículas alfa. En aquella época, dicha fluorescencia solo podía verse y registrarse usando microscopios dispuestos en la zona donde se preveía que iba a impactar la partícula. Con los detectores electrónicos actuales, contabilizar todos los impactos es una tarea sencilla. En aquel entonces ese trabajo se tenía que realizar

FIG. 1

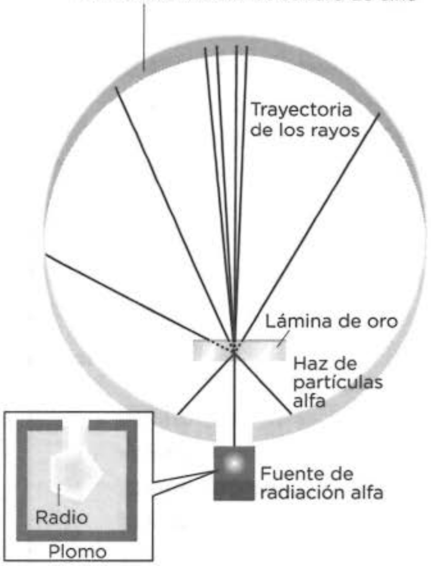


FIG. 2

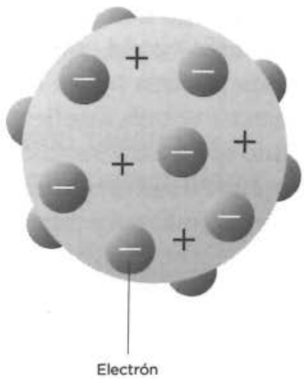


FIGURA 1: **En el experimento que condujo al descubrimiento del núcleo atómico se colocó una fuente de rayos alfa, que bombardeaban una lámina de oro rodeada por una pantalla que emitía fosforescencias cuando los rayos impactaban en ella.**

FIGURA 2: **El modelo atómico de Thomson, con las partículas negativas flotando en una sustancia cargada positivamente.**

por observación directa, contando uno a uno cada centelleo de luz. Era necesario incluso habituar los ojos a la oscuridad antes de iniciar los experimentos, para que se dilataran las pupilas y así poder ver mejor los destellos. Se trataba de una labor dura y repetitiva, pero gracias a la huella fluorescente se podía establecer el punto de impacto en la pantalla detectora, y de esta manera determinar la trayectoria que trazaban las partículas que atravesaban la lámina. Para generar las partículas alfa, se usó radio o radón, que son elementos muy radiactivos. Con la finalidad de dirigir los rayos en la dirección deseada, se colocó la fuente en un recipiente de plomo —capaz de absorber la radiación— dotado de una fina ranura que permitía dirigir los rayos hacia la cámara de vacío donde se encontraba la lámina (figura 1).

La única partícula subatómica conocida en aquella época eran los electrones, de los que se sabía que tenían carga negativa y masa ínfima en comparación con los átomos. Como el átomo mostraba una carga global neutra, J.J. Thomson, el descubridor

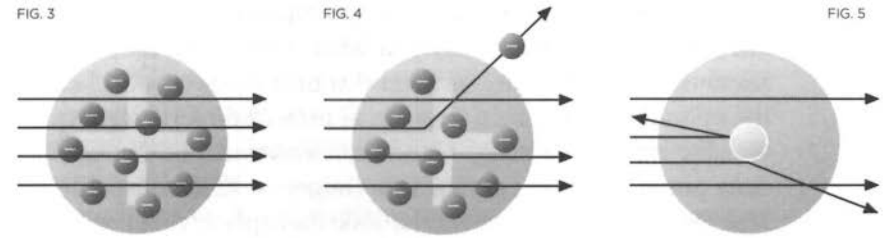
de los electrones, pensó que las cargas negativas tenían que flotar en una sustancia vaporosa de carga positiva, como si fuera una niebla, o bien como si el átomo fuera una pecera donde los peces serían los electrones y el agua la carga positiva. Este modelo atómico se denominó *modelo de Thomson* (figura 2), aunque se popularizó con el nombre de «modelo del pastel de pasas» (en el que las pasas representan los electrones). En esta concepción destaca la ausencia de otras partículas que no sean los electrones.

Ante un experimento como el descrito, lo lógico sería que las partículas alfa atravesaran la lámina sin apenas desviarse, dado que en el interior del átomo no se esperaba que hubiera nada sólido aparte de los electrones, de tamaño mucho menor en comparación con las partículas alfa (figura 3). La partícula incidente seguiría su trayectoria rectilínea hasta impactar en la superficie detectora. Por esa razón, a Rutherford siempre le había sorprendido hallar esas ligerísimas desviaciones, que parecían contradecir el modelo atómico de Thomson. Si el modelo del pastel de pasas era válido, ¿con qué chocaban las partículas para que variara su trayectoria? (figura 4). Era un fenómeno incordiante e inesperado, y por esa razón quería insistir en este tipo de experimentos. Hasta entonces, las investigaciones indicaban que se requerían miles de voltios para desviar las partículas alfa. ¿Se debían las desviaciones a imprecisiones en la ejecución de los experimentos o en la disposición de los aparatos? ¿O bien se trataba de una propiedad intrínseca de los elementos del experimento?

En lugar de ignorar este hecho, Rutherford planteó a Geiger y, sobre todo, a Marsden el reto de construir un aparato que

Según el modelo de Thomson, los átomos estarían compuestos por partículas, los electrones, que flotarían en una sustancia de carga positiva. Al bombardear con las partículas alfa, estos deberían atravesar los átomos sin interrupciones ni desviaciones (figura 3). Sin embargo, los experimentos mostraban que una parte de ellos se desviaban (figura 4). Rutherford llegó a la conclusión de que en el interior de los átomos tenía que existir algo más que hasta ese momento había pasado desapercibido. Para resolver esta anomalía, señaló que tenía que existir un núcleo masivo cargado positivamente (figura 5).

FIG. 3 FIG. 4 FIG. 5



ampliara el campo de detección de los posibles centelleos (figura 1). Hasta el momento, el aparato se había diseñado para observarlos exclusivamente en la parte central, dando a entender que los rayos iban en línea recta o solo se producía una ligera desviación. ¿Sería posible encontrar centelleos fuera de los reducidos márgenes en los que se concentraba la investigación hasta ese momento? El problema técnico residía en poder mover el microscopio por toda la cámara para observar impactos sin que esta posibilidad afectara al vacío creado en el interior de la cámara. Marsden, junto a Geiger, lograron un diseño elegante y efectivo.

Según sus cálculos, por cada gramo de radio se llegaban a emitir unos treinta mil millones de rayos alfa. Marsden observó que la inmensa mayoría de impactos eran consistentes con la predicción y atravesaban la lámina sin desviarse. Sin embargo, en uno de cada ocho mil casos se producía la inexplicable desviación. Marsden repitió el experimento y contabilizó miles de impactos, pero la anomalía siguió apareciendo de forma persistente.

Es más: para sorpresa de todos, los investigadores siguieron registrando impactos con ángulos de desviación de incluso 90°, y alguno llegaba hasta los 180° (es decir, la partícula alfa salía rebotada de la lámina de oro y literalmente retrocedía hacia el punto de partida). A medida que las observaciones se alejaban del lugar previsto de impacto en una trayectoria rectilínea, el porcentaje disminuía, pero no era nulo. El experimento mostraba a todas luces que la estructura del átomo no era como se había creído. Tenía que existir algo extraordinariamente «duro» en su interior y además ocupando un espacio sumamente pequeño en comparación con el tamaño del propio átomo para explicar que solo un porcentaje de los rayos se desviara (figura 5). «Resultó tan increíble como si se hubiera lanzado una bala de 15 pulgadas hacia un trozo de papel de seda y la bala hubiera rebotado hacia ti», comentó Rutherford más tarde, reflejando toda su sorpresa y estupor ante el hallazgo —aunque cuando explicaba esta anécdota ponía esta frase en boca de Geiger—. El descubrimiento de Marsden y Geiger se publicó en 1909 en la prestigiosa publicación científica *Proceedings of the Royal Society*.

EL PROBLEMA DE LA INTERPRETACIÓN

Nadie era capaz de descifrar el significado de los resultados del experimento. Con los datos en la mano, lo que Rutherford hizo seguidamente fue volver a estudiar. Se dio cuenta de que necesitaba dominar las nociones de estadística y probabilidad si quería extender sus ideas sobre el átomo, basadas en una pequeña muestra, a todos los átomos del universo. Todo un premio Nobel como él no tuvo problemas en volver a atender a los cursos de estadística y probabilidad que ofrecía la universidad.

> «Considerando las pruebas en su conjunto, es más sencillo suponer que el átomo contiene una carga central distribuida en un volumen muy pequeño, y que las grandes desviaciones individuales se deben a la carga central como un todo, y no a sus constituyentes.»
>
> — Ernest Rutherford.

El paso hacia la aceptación del núcleo atómico y finalmente a hallar el protón como partícula portadora de carga eléctrica fue lento. Al analizar estadísticamente la información de las partículas alfa que traspasaban y se desviaban, se dio cuenta de que tenía que existir una minúscula estructura interna. A finales de 1910, anunció que había dado con la solución, que publicó el 7 de marzo de 1911 en un artículo titulado «La dispersión de rayos alfa y beta y la estructura del átomo». En lugar de hablar de núcleo atómico, en ese artículo Rutherford solo se refería a «una carga central distribuida en un volumen muy pequeño». Tampoco se atrevió a adelantar en esa primera publicación el signo de la carga central. Dos años más tarde, en su libro *Radioactive Substances and Their Radiations (Sustancias radiactivas y sus radiaciones)*, ya introdujo la noción de núcleo del átomo y también consideró que su carga es positiva, mientras que las cargas eléctricas negativas giran a su alrededor.

Pudo determinar que el diámetro de esta estructura interna tenía que ser de unos 10^{-14} m, es decir, diez mil veces más pequeño

EL DESCUBRIMIENTO DEL NÚCLEO

En 1911, Rutherford publicó su nueva teoría atómica en un artículo titulado «La dispersión de rayos alfa y beta y la estructura del átomo», en el que se podía leer:



El físico alemán Hans Geiger en 1928.

> Es bien conocido que las partículas alfa y beta se desvían de su camino rectilíneo al encontrarse con los átomos de materia... Parece que no hay duda de que estas partículas en rápido movimiento realmente atraviesan el sistema atómico, y las desviaciones que se observan deben arrojar luz de la estructura eléctrica del átomo [...]. Geiger y Marsden descubrieron que una pequeña fracción de las partículas alfa incidentes en una fina lámina de oro sufre un desvío de más de 90 grados [...]. Parece cierto que estas desviaciones de las partículas alfa están producidas por un único encuentro atómico [...]. Un cálculo simple muestra que el átomo tiene que ser el asiento de un campo eléctrico intenso [...]. Teniendo en cuenta la evidencia en su conjunto, lo más simple es suponer que el átomo contiene una carga central distribuida en un volumen muy pequeño [...]. Al comparar la teoría expuesta aquí con los resultados experimentales, se ha supuesto que el átomo consiste en una carga central concentrada en un punto.

que un átomo. Es frecuente comparar el tamaño del núcleo del átomo como una mosca en el interior de una catedral, una insignificancia que, por otro lado, concentra casi el 99% de la masa de dicho átomo. El resto se diría que está enigmáticamente vacío y carece de límites definidos, solo perturbado puntualmente por el paso de los electrones.

Ernest interpretó que las partículas rebotaban debido a la fuerza de repulsión producida entre cargas eléctricas del mismo signo. Estaba ya firmemente aceptado que cuando las cargas tienen el mismo signo se repelen, y solo cuando son de signo con-

trario se atraen. Este fue el camino que permitió a Rutherford, en 1913, deducir que como los rayos alfa tienen carga positiva, el desvío que sufrían al atravesar la lámina de oro se debía a que se encontraban en su camino con partículas del mismo signo. De igual manera, como la mayoría de las partículas alfa atravesaban la lámina sin desviarse era debido a que no pasaban cerca de ninguna carga positiva. El descubrimiento del protón tuvo lugar posteriormente, en 1918, cuando Rutherford no se conformó con descubrir el núcleo atómico, sino que también quiso descomponerlo en pedazos para estudiar su interior.

EL ATOMISMO

El descubrimiento de Rutherford llegó en un momento convulso de la historia de la física. El modelo atómico de Thomson se había propuesto relativamente hacía pocos años, y aún seguía sin haber consenso sobre la propia existencia del átomo. Los químicos y físicos habían pasado casi un siglo divididos entre los que pensaban que el atomismo no era más que palabrería sin sentido y los que afirmaban que se trataba del fundamento de todos los elementos. Numerosos modelos competían con hechos experimentales, y el resultado era sumamente confuso.

El camino recorrido por la hipótesis del átomo había sido largo. Fue desde siempre una concepción ligada a la polémica, y sus partidarios eran a menudo acusados de ser impíos materialistas, y perseguidos por ello. Los primeros atomistas vivieron en la antigua Grecia. Para Demócrito (460-370 a.C.), los átomos eran los constituyentes últimos de la realidad, unas entidades indivisibles, indestructibles e imperecederas a partir de las cuales se formaban todas las cosas. Tal como expone en uno de los fragmentos de su obra: «Por convención son lo dulce y lo amargo, lo caliente y lo frío; por convención es el color; de verdad existen los átomos y el vacío».

El atomismo fue durante siglos una corriente filosófica más bien minoritaria. Autores como Epicuro pensaron que los átomos

se arremolinaban creando infinidad de «mundos» con sus dioses incluidos. Tampoco el alma se escaparía al imperio del átomo al estar constituida por átomos sutiles. A lo largo de la historia, científicos destacados, como Galileo y Newton, defendieron el atomismo, lo cual supuso un gran impulso a la difusión de esta corriente. Sin embargo, su anclaje en la realidad brillaba por su ausencia. Se carecía del peso de la prueba para que pudiera imponerse sin ambages a otras concepciones filosóficas. En la primera edición de la *Enciclopedia Británica* (entre 1768 y 1771), en la

EPICURO Y EL CLINAMEN



Grabado de Epicuro en la edición de *Historia de la filosofía*, de Thomas Stanley (1655).

Epicuro (341-270 a.C.) fue un filósofo griego nacido en Samos. Hijo de atenienses, acabó fundando en Atenas el Jardín, un lugar retirado destinado a cultivar el conocimiento y la amistad. Epicuro situaba el placer —que entendía de manera muy semejante al ascetismo— en el centro de la vida humana. Se dedicó a combatir los temores humanos, como el temor a la muerte, mostrando que se trataba de temores fundados en creencias erróneas. Para Epicuro, el número de átomos tenía que ser infinito (al igual que el universo). Los átomos eran eternos, indivisibles e inmutables, y estaban dotados de forma, extensión y peso. El atomismo conduce a una concepción mecanicista del universo donde parece que no hay lugar para el libre albedrío. Para salvaguardar esta noción, Epicuro se vio obligado a introducir la idea de *clinamen*, que sería como una desviación azarosa de los átomos. Gracias al clinamen, Epicuro podía introducir en el universo un cierto grado de incertidumbre, lo que le permitía conciliar estas nociones con el libre albedrío.

entrada «átomo» apenas se dejaba constancia de que se tratara de una corriente filosófica: «En filosofía, una partícula de materia tan pequeña que no admite división. Los átomos son la *minima naturae* (los cuerpos más pequeños) y se conciben como los primeros principios de toda magnitud física». A partir del siglo XIX, el desarrollo de la física y la química obligó a ampliar considerablemente esta definición.

LOS ÁTOMOS PARA LA QUÍMICA

El atomismo experimentó un nuevo renacimiento en el siglo XIX, principalmente de la mano de la química, que tuvo varias causas, entre las que cabe destacar el derrumbe de la doctrina de los cuatro elementos que había monopolizado la interpretación de la naturaleza durante casi dos mil años. Antoine Lavoisier (1743-1794) descubrió que el agua, que hasta entonces se había considerado como uno de los elementos fundamentales de la naturaleza, junto con el fuego, la tierra y el aire, en realidad era un compuesto de oxígeno e hidrógeno. Este hallazgo dio origen a una nueva manera de entender la naturaleza de las cosas capitaneada por la ciencia química. Sin embargo, Lavoisier era muy escéptico respecto al concepto de átomo.

> «Es muy probable que nunca sepamos nada de los átomos.»
>
> — ANTOINE LAVOISIER, QUÍMICO FRANCÉS.

Quien situó de manera definitiva los átomos en el centro del panorama químico de la época fue John Dalton (1766-1844), que aprovechó el viejo atomismo para colocarlo como base de los pesos atómicos relativos de los elementos que había descubierto.

Dalton, cuya profesión era profesor de escuela, publicó en 1803 la llamada *ley de las proporciones múltiples*, que afirma que elementos químicos diferentes se combinan según múltiplos enteros de sus pesos elementales. En sus propias palabras, esta ley enuncia lo siguiente:

DALTON, PIONERO DEL ÁTOMO

Hijo de una familia de cuáqueros de Cumberland (Inglaterra), John Dalton (1766-1844) inició su carrera científica como meteorólogo, y se piensa que sus concepciones sobre el átomo proceden precisamente de sus estudios sobre la atmósfera. Dalton, por ejemplo, fue el primer científico en darse cuenta de que el aire no era una sustancia homogénea, sino que estaba compuesta principalmente por nitrógeno (80 %) y oxígeno (alrededor del 20 %). Además de describir la enfermedad del daltonismo —cuyo nombre es en su honor—, Dalton, que se dedicó básicamente a la docencia y fundó una academia, escribió en 1804 con respecto a la teoría atómica:



1. Pequeñas partículas llamadas átomos existen y componen toda la materia; 2. Son indivisibles e indestructibles; 3. Los átomos del mismo elemento químico tienen las mismas propiedades químicas y no se transmutan o cambian en otros elementos.

En la concepción de las proporciones múltiples propuesta por Dalton, ley de Dalton, que en la actualidad aún se enseña en química básica, se sigue, por ejemplo, el principio de conservación de la masa. En toda reacción química, la masa de los reactivos será igual a la de los productos.

Cuando dos o más elementos se combinan para dar más de un compuesto, las masas de uno de ellos, que se une a una masa fija del otro, tienen como relación números enteros y sencillos.

Dalton interpretó estas proporciones como una manifestación del atomismo. Si se piensa que un compuesto se forma a partir de átomos de distintos elementos que ya guardan una cierta proporción de peso entre sí, entonces, por mucha cantidad de compuesto que tomemos, siempre guardarán la misma proporción. Dalton había descubierto una característica macroscópica —una relación

constante de las masas de los componentes de una sustancia heterogénea con los pesos de los componentes de una sustancia— que interpretó como una consecuencia de fenómenos que tenían lugar a nivel microscópico y la combinación específica de varios tipos de átomos.

Respecto a los átomos, Dalton siguió manteniendo que eran indivisibles y que no se podían ni crear ni destruir, de modo que en un proceso químico los átomos únicamente se recombinan. Estableció que cada elemento estaba constituido por un tipo de átomos iguales entre sí y diferentes al resto de los elementos. Una de las características que Dalton determinó para diferenciar los átomos residía en su peso atómico. También afirmó que los átomos se combinaban para constituir compuestos químicos.

Su creencia en la indestructibilidad de los átomos le llevó a defender la ley de la conservación de la materia (que había propuesto anteriormente Lavoisier): «Sería tan absurdo tratar de introducir un nuevo planeta en el sistema solar o de aniquilar uno ya existente, como tratar de crear o destruir una partícula de hidrógeno». A pesar de la convicción de Dalton, gracias al trabajo realizado por Rutherford que se explicará en el siguiente capítulo se pudo demostrar que la de Dalton era una visión incompleta.

EL DEBATE

Durante el siglo XIX, numerosos científicos consideraron que este salto de lo macroscópico a lo microscópico, cuya comprensión se basaba en experimentos científicos, era inaceptable porque no se basaba en observaciones. La crítica al atomismo encontró numerosos argumentos en una nueva concepción filosófica nacida en Francia y que se denominó *positivismo*. Para su fundador, el sociólogo francés Auguste Comte (1798-1857), la ciencia tenía que basarse en hechos contrastables. Cualquier afirmación sobre la realidad que no tuviera un último asidero en los hechos tenía que ser considerada como una especulación metafísica que tenía que rechazarse. El atomismo adolecía de todos los defectos que el positivismo atribuía al discurso hueco de la metafísica.

Uno de los científicos que con más ahínco se opuso a los átomos fue Jean-Baptiste Dumas (1800-1884):

> ¿Qué queda de la ambiciosa excursión que nos habíamos permitido iniciar por la región de los átomos? Nada firme, parece. Lo que nos queda es la convicción de que la química se extravía, como siempre, cuando, abandonando la experiencia, pretende avanzar entre tinieblas [...]. Si estuviera en mi mano, yo borraría la palabra átomo de la ciencia, porque estoy convencido de que va más allá de los experimentos.

Esta actitud de rechazo contrastaba con la de otros químicos, como la de William Prout, quien en 1815 llegó a la conclusión de que todos los átomos eran en realidad uniones de átomos de hidrógeno (que guarda relación directa con lo que Rutherford pudo contrastar).

«¿Quién ha visto alguna vez una molécula de gas o un átomo?»

— **Marcellin Berthelot (1827-1907), químico e historiador francés.**

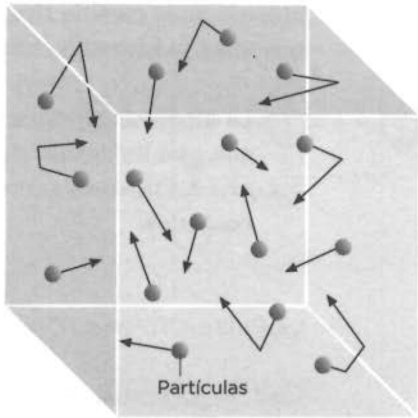
Las evidencias sugerían que, en último término, tenía que haber átomos, pero al fallar la verificación directa (y el hecho de que muchos científicos creyeran que por definición dicha prueba quedaba fuera de nuestras capacidades) preferían descartar la hipótesis antes que fundamentar la química moderna en una base exclusivamente teórica.

EL TURNO DE LA FÍSICA

La agria disputa iniciada en el seno de la química se extendió a la física. En este caso, el campo de batalla sobre los átomos fue la termodinámica y el estudio del calor. Mientras que sobre el calor los científicos se habían centrado en investigar factores macroscópicos y magnitudes físicas observables, las aportaciones de James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann dieron un giro a esa

concepción. Ambos trataron de estudiar dichas nociones a partir del movimiento de átomos, pero con la novedad de prescindir de la trayectoria individual de cada átomo y en su lugar calcular el comportamiento estadístico de los átomos en conjunto.

Según esta teoría, un gas está compuesto por un conjunto de átomos que chocan entre sí o con las paredes del recinto en el que se encuentran, como si fueran bolas de billar (véase la figura). Maxwell y Boltzmann determinaron que la energía media de cada uno de los átomos de un gas en su continuo movimiento estaba relacionada con la presión y la temperatura.



Según la teoría cinética de los gases, un gas está compuesto por átomos y moléculas en constante movimiento que chocan entre sí y con las paredes del recipiente. A mayor energía acumulada, las partículas se moverán más rápido, habrá más colisiones y la temperatura del sistema será mayor.

Tal como había ocurrido entre los químicos, numerosos físicos también eran reacios a creer las teorías atómicas. Existían numerosas razones, entre las que se encontraba, por ejemplo, la economía de pensamiento. Explicar lo observable a partir de lo inobservable era un paso en falso, según creían científicos como el austriaco Ernst Mach. Boltzmann, que había dedicado toda su vida a defender el atomismo, acabó suicidándose en 1906, poco tiempo antes de que Rutherford realizara su definitiva incursión en el mundo atómico.

DESENTRAÑAR LA CAJA NEGRA

Las dudas y las confrontaciones en torno al átomo remitieron cuando empezaron a detectarse constituyentes de su estructura interna, principalmente los electrones, los protones y, décadas más tarde, los neutrones. Esta labor estuvo en manos ya no de químicos, sino de físicos (aunque a menudo los ámbitos de las áreas

de estudio de ambos se solapan). El científico francés teórico y filósofo de la ciencia Henri Poincaré (1854-1912) resumió este giro que tomó la investigación sobre los átomos de la siguiente manera:

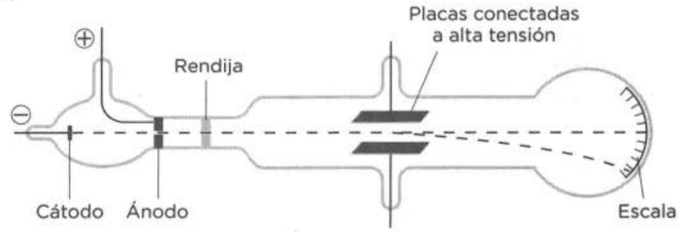
> La hipótesis atómica ha adquirido últimamente tal consistencia que casi ha dejado de parecer una hipótesis: los átomos no son una ficción útil, podemos decir que los vemos porque podemos contarlos.

LA ESTRUCTURA ATÓMICA

En 1897 se pudo medir el electrón. El físico británico Joseph John Thomson (1856-1940) detectó por primera vez unas partículas de carga negativa que pasaron a llamarse *electrones*. Dilucidar su naturaleza y características fue un gran hallazgo.

Este descubrimiento pudo realizarse gracias a los rayos catódicos, haces de electrones que se generan en un tubo de vacío —llamado tubo de Crookes—, enrarecido con una pequeña cantidad de gases, en el que hay un ánodo y un cátodo (figura 6). Tras aplicar una diferencia de potencial, surgen unos rayos del cátodo (haces de electrones) que emiten una luz verdosa al impactar en el extremo del tubo de vidrio, debido a fluorescencia, y que se caracterizan, en principio, por desplazarse en línea recta. Esto último se descubrió al colocar una figura en medio del tubo: en ese caso aparece una sombra en la pared del fondo (figura 7). Tam-

FIG. 6



bién se observó que estos rayos, al chocar contra un objeto como un molinete, eran capaces de moverlo (figura 8). Esto implica que los rayos tienen que estar compuestos por unas partículas con masa. Y, por último, se descubrió que tenían carga eléctrica, negativa, porque, al someter los rayos a un campo magnético, la proyección en el vidrio se desplazaba respecto de la trayectoria recta, dado que los rayos eran atraídos por el imán cuando se acercaba el polo positivo y se alejaban cuando se acercaba el polo negativo (figura 9). Thomson había identificado los electrones.

FIG. 7

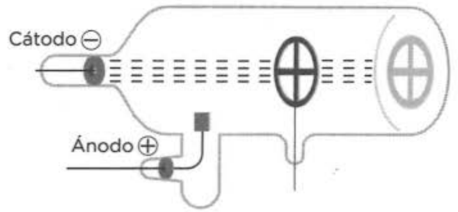


FIG. 8

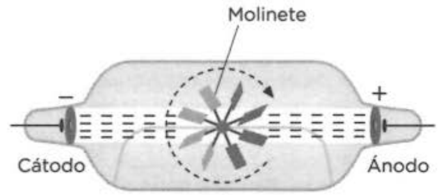
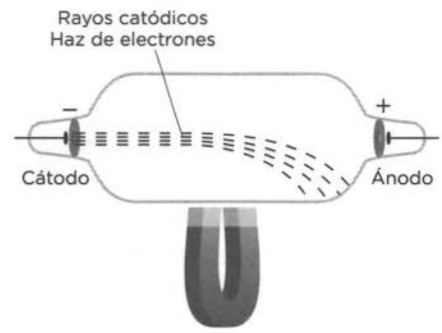


FIG. 9



Estas partículas, que Thomson comenzó llamando «corpúsculos» —el nombre de electrón se lo dio George Johnstone Stoney (1826-1911)— tenían una característica remarcable: se encontraban en todos los elementos. Thomson comprobó que cualquiera que fuera la procedencia de dichos corpúsculos y se escogiera el elemento que se escogiera, las partículas mostraban las mismas propiedades físicas. Thomson expresó de la siguiente manera este descubrimiento:

> Ya que los electrones pueden ser producidos por cualquier elemento químico, podemos concluir que entran en la constitución de todos los átomos. Hemos dado el primer paso hacia la comprensión de la estructura del átomo.

EL TAMAÑO DE LOS ÁTOMOS

El movimiento browniano es un efecto atómico pero fácil de observar —solo se requiere un microscopio y unas partículas de polen—, pero durante décadas permaneció sin explicación. Todo empezó cuando en 1827 el botánico escocés Robert Brown observó que el polen, al quedar suspendido en agua, se movía de forma aleatoria y sin causa aparente. Tendría que permanecer en reposo, pero a Brown le causó una gran curiosidad tratar de entender ese movimiento. Solo alguien como Albert Einstein se atrevió a aventurar una explicación en uno de sus artículos publicados en 1905, su año milagroso. Einstein llegó a la conclusión de que dicho movimiento estaba causa-



El físico francés Jean-Baptiste Perrin en una foto tomada en 1926.

Thomson había observado por primera vez un elemento estructural de los átomos. Sin embargo, este descubrimiento obligaba a plantearse nuevas preguntas. Dado que el átomo acostumbra a presentarse con una carga neutra, ¿qué es lo que contrarresta la carga negativa de los electrones? Y dada la minúscula masa de los electrones, ¿dónde se encuentra la masa de los átomos? Thomson expresó en 1899 sus dudas sobre la carga:

> Aunque los electrones se comportan individualmente como iones negativos, cuando se incorporan a un átomo neutro su efecto negativo es contrarrestado por algo que hace que el espacio en el cual estas partículas están distribuidas se comporte como si tuviese una carga positiva igual a la suma de las cargas negativas de estas partículas.

Con los elementos de que disponía, Thomson se atrevió a proponer el modelo atómico al que ya hemos hecho referencia, y que se conoció como el «modelo del pastel de pasas». También quiso

do por los impactos de los átomos del aire y del agua sobre los granos de polen. Los átomos en un gas se encuentran en constante movimiento, pero su tamaño impide que podamos observarlos. Las partículas de polen son suficientemente ligeras como para verse afectadas por este movimiento y, al mismo tiempo, lo bastante grandes para poder verlas. Se trataba, por tanto, de una confirmación de la teoría atómica.

La aportación de Perrin

Las elucubraciones de Einstein requerían de un respaldo empírico. Lo proporcionó el trabajo de Jean-Baptiste Perrin (1870-1942), por el que fue galardonado con el premio Nobel de Física en 1926. Perrin se aprovechó de la introducción del ultramicroscopio, y gracias a sus estudios pudo determinar el tamaño de la molécula de agua y también de los átomos que la componían. Tal como publicó en 1913, un átomo tenía el tamaño de 10^{-10} m. Perrin también estuvo involucrado en las investigaciones sobre la estructura atómica y propuso modificar el modelo de Thomson para señalar que los electrones tenían que encontrarse en la parte más externa del átomo (o, según la imagen del pastel de pasas, las pasas había que buscarlas por la superficie del pastel). Se trataba, en cualquier caso, de una intuición relativamente correcta.

justificar la masa de los átomos a partir exclusivamente de los electrones. Pero como cada uno de los electrones tiene una masa muy pequeña, eso obligaba a plantear que en cada átomo hubiera un elevado número de electrones. Esta hipótesis finalmente tuvo que rechazarse cuando se comprobó que el número de electrones que tenía cada átomo solía coincidir con el número atómico del elemento en la tabla periódica. El modelo de Thomson dejaba demasiados cabos sueltos.

UN SISTEMA PLANETARIO INCONGRUENTE

En este punto es cuando irrumpe el experimento de Rutherford descrito al inicio del presente capítulo. El físico y químico neozelandés logró dar en el blanco del núcleo atómico, y a partir de ese momento modificó para siempre nuestra comprensión del átomo.

La imagen que confeccionó Rutherford guardaba enormes semejanzas con un sistema solar en miniatura, con un núcleo que ejercería de estrella en su posición central y unos electrones que serían el equivalente a planetas girando a su alrededor. Las concepciones de Rutherford continúan siendo el armazón con el que se siguen explicando los átomos a nivel básico. Pero como todo descubrimiento científico de calado, despertaba más preguntas de las que resolvía. ¿Cómo se ordenaban los electrones alrededor del núcleo? ¿De qué se componía dicho núcleo? Había una incógnita que, sin embargo, destacaba por encima del resto.

«En 1911, Rutherford introdujo el mayor cambio en nuestra idea sobre la materia desde los tiempos de Demócrito.»

— **Sir Arthur Eddington (1882-1944), astrofísico británico.**

Según este modelo, el electrón giraría alrededor del núcleo, ligado a este por ser de carga opuesta a la del núcleo. Pero atendiendo a la electrodinámica clásica, cuando un electrón se mueve de forma circular, tiene que emitir radiación y, por tanto, pierde energía. Eso significaría que en breve tiempo el electrón se precipitaría sobre el núcleo. Ese colapso daría al traste con todo lo que conocemos de la realidad, donde la materia es estable. Es decir, alguna de las leyes y modelos que se manejaban entraban en contradicción. Lo más natural sería poner en entredicho este modelo atómico en vez de dudar de teorías aceptadas por la comunidad científica, como el electromagnetismo. Sin embargo, las evidencias eran sólidas y Rutherford había desvelado una estructura atómica de la que no cabía dudar. Según su modelo, la estabilidad de los átomos era un fenómeno imposible, pero era algo que estaba sucediendo en todo momento. Al presentar su descubrimiento en 1911 ante la Royal Society, no pudo más que mostrar su perplejidad ante los acontecimientos. Eran necesarias nuevas leyes para explicar lo que acontecía en el átomo, dado que no parecían ser aplicables las mismas leyes que operan en los objetos cotidianos desde un punto de vista macroscópico.







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Ernest Rutherford en 1908.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
El físico británico Joseph John Thomson, tutor de Rutherford durante su estancia en el laboratorio Cavendish, está considerado el descubridor del electrón por sus experimentos con flujos de partículas (electrones) de rayos catódicos.

FOTO INFERIOR:
El físico alemán Hans Wilhelm Geiger (izquierda) y Ernest Rutherford.

En 1911, Rutherford asistió con gran excitación al encuentro científico que supuso el inicio de la física cuántica. Se trata de la conferencia Solvay —por haber sido promovida por el químico multimillonario belga Ernest Solvay—, que dio cita en Bruselas a los más eminentes científicos de la época. En ese primer congreso, que se celebraría posteriormente de forma periódica, se encontraban Albert Einstein, Max Planck —que habían sido los principales impulsores de la física cuántica hasta el momento—, Henri Poincaré, Marie Curie y Hendrick Lorentz, entre otros. Es decir, reunió

NIELS BOHR



El físico danés Niels Henrik David Bohr (1885-1962) nació en Copenhague. Su padre, candidato al Nobel en dos ocasiones, era médico, y su madre pertenecía a una familia adinerada. Estudió física en la Universidad de Copenhague. Tras doctorarse, amplió sus estudios junto a J.J. Thomson en Cambridge, pero no congeniaron. Al conocer a Rutherford decidió proseguir sus estudios en Mánchester con un proyecto ambicioso: el modelo atómico que recientemente había propuesto el físico neozelandés implicaba una cierta inestabilidad de la materia, de modo que era necesario encontrar un modelo más satisfactorio. Se trató de la primera gran incursión de Bohr en la física atómica, y superó las dificultades con brillantez. Aplicó las leyes cuánticas al núcleo del átomo y de este modo pudo presentar un modelo atómico estable, apartado de las leyes de la física clásica. Su nuevo modelo atómico fue publicado en tres artículos de 1913 en la revista *The Philosophical Magazine*. Posteriormente fue contratado por la Universidad de Copenhague como profesor, y allí impulsó la creación del Instituto de Física

a algunos de los científicos más brillantes de la época. Al regresar a Mánchester después de una reunión tan vibrante, Rutherford conoció a un joven científico llamado Niels Bohr. Este encuentro fue decisivo.

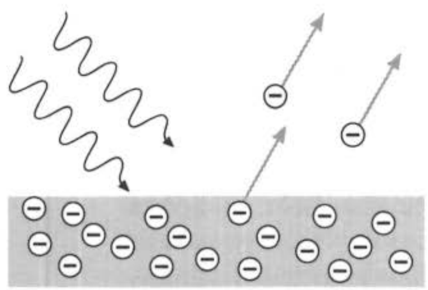
Bohr se había doctorado en Copenhague a principios de 1911 con una tesis sobre la teoría electrónica de los metales. Por esa razón quiso trabajar junto a J.J. Thomson, pero la experiencia fue en realidad frustrante, dado que ambos científicos no congeniaron. Sin embargo, a finales de ese mismo año, Bohr conoció a Rutherford y pidió realizar sus estudios posdoctorales junto a él. Tras acordarlo con Thomson, en 1912 Bohr empezó su trabajo.

Teórica, del que fue director desde 1920 hasta su muerte. Bohr y Rutherford mantuvieron el contacto a lo largo de toda su vida.

Principio de complementariedad y nazismo

En 1922, Bohr fue reconocido con el premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la estructura atómica y la radiación. En torno a su instituto se formaron una serie de físicos que impulsaron la física cuántica, entre los que destacó el alemán Werner Heisenberg. Bohr, además, contribuyó, junto a Heisenberg y Born, a fundamentar la llamada «interpretación de Copenhague» de la física cuántica. Fue él quien introdujo el *principio de complementariedad*, según el cual la física cuántica permite aunar tanto la naturaleza ondulatoria como la corpuscular de las partículas elementales. En la física clásica serían aproximaciones antagónicas, pero la descripción de los fenómenos observados en las partículas elementales requiere apoyarse en ambas. Tras la llegada al poder del nazismo, la gran amistad que unía a Bohr y Heisenberg se quebró para siempre, por la participación del físico alemán en la fabricación de la bomba atómica. Al estallar la guerra, Bohr se vio obligado a escapar de Copenhague para no ser apresado por los nazis durante la ocupación de Dinamarca. A pesar de ser un pacifista convencido, dio su apoyo al proyecto Manhattan, para que Estados Unidos desarrollara también la bomba atómica. Después de la guerra, contribuyó a la creación del Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN, siglas de su nombre en francés), hoy día la máxima institución mundial sobre investigación en física de partículas con el LHC (Large Hadron Collider). Bohr tuvo seis hijos, uno de los cuales, Aage Bohr (1922-2009), lo sustituyó en la dirección del Instituto de Física Teórica de Copenhague tras su muerte. Aage obtuvo el premio Nobel de Física en 1975 por su descubrimiento del movimiento de las partículas en el núcleo atómico.

FIG. 10



Bohr era un físico principalmente teórico y con poca experiencia en la investigación experimental, pero eso no impidió que aquella colaboración fuera muy fructífera (quizá ayudó el hecho de que ambos fueran apasionados deportistas, uno muy aficionado al rugby y el otro al fútbol).

Aunque Rutherford le había asignado una serie de experimentos, finalmente lo liberó de ese trabajo para que pudiera dedicarse por completo al modelo atómico, asunto con el que Bohr había quedado fascinado. Estaba convencido de que iba a encontrar la manera de superar el problema de la inestabilidad de los electrones.

El efecto fotoeléctrico es un ejemplo de interacción luz-materia, por el cual se explica que al incidir con radiación electromagnética (típicamente luz ultravioleta) sobre un material, se produce una absorción de energía, llegando a arrancar electrones del material irradiado (emisión de electrones).

Bohr resituó en el seno de los átomos algunos de los principios cuánticos que se empezaban a gestar con las grandes aportaciones de Max Planck y Albert Einstein para así lograr estabilizar el modelo atómico de Rutherford. Según Planck, la energía no era continua, sino que existía en forma de paquetes. Einstein, por su lado, usó la física cuántica para explicar el efecto fotoeléctrico (efecto por el que un metal emite electrones cuando incide sobre él radiación electromagnética). Einstein propuso que los electrones absorbían la energía de los fotones, y esta energía les permitía liberarse de los átomos y emitirse al adquirir la suficiente energía cinética, desligándose del núcleo (figura 10).

Bohr conocía muy bien las ideas cuánticas que se habían empezado a gestar desde principios de siglo. Empezó por afirmar que los electrones no irradiaban energía mientras se movían alrededor del átomo, y por eso no se precipitaban en el núcleo atómico. Este paso tan simple suponía en realidad subvertir las leyes del electromagnetismo y proclamar que estas no eran de aplicación en el interior del átomo.

Según Bohr, los electrones solo podían moverse por unas órbitas concretas y prefijadas. No todas las órbitas están permitidas

ni los electrones pueden girar caóticamente alrededor del núcleo. Bohr estableció que los electrones se tienen que ir situando a unas distancias determinadas del núcleo, que constituyen niveles o capas, y cada uno de estos niveles tiene asociado cierta energía. Los electrones más próximos al núcleo están más fuertemente ligados a él, y viceversa. Mientras los electrones permanecen en uno de los niveles de energía, no sufren ninguna variación ener-

LAS LÍNEAS ESPECTRALES

Cuando se hace pasar un rayo de luz blanca por un prisma, la luz se descompone en los diferentes colores (longitudes de onda del espectro electromagnético visible). Si previamente a la dispersión cromática la luz ha atravesado un gas, entonces al descomponerla se observa un curioso fenómeno en el que diversas franjas de colores están ausentes. Este fenómeno, llamado «espectro de absorción», tiene su complementario en el espectro de emisión, que se obtiene cuando ese mismo gas se lleva a una temperatura elevada hasta que llega a emitir luz. Si se filtra esa luz, se observan únicamente ciertas franjas de color. Como se muestra en la figura, si se trata del mismo gas, se observa que el espectro de emisión y de absorción de un material encajan perfectamente. Científicos como Gustav Kirchhoff (1824-1887) —inventor del espectroscopio— habían puesto al descubierto que todos los elementos tienen asociado un espectro de emisión único y característico. Se puede considerar como una huella gracias a la cual, por ejemplo, es posible saber los componentes químicos presentes en una estrella lejana. Johann Jakob Balmer (1825-1898), por su parte, contribuyó a la comprensión de este fenómeno al lograr relacionar las líneas espectrales con la longitud de onda y la frecuencia de la luz (y su energía).

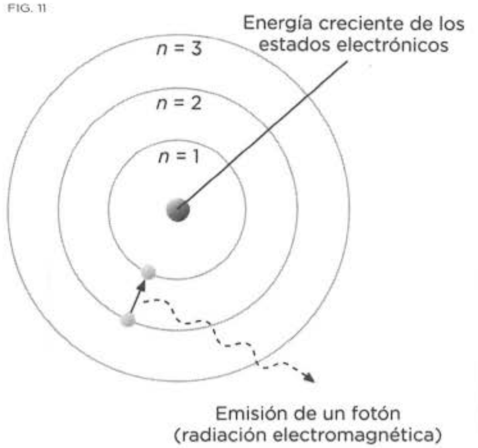
Espectro de absorción



Espectro de emisión



FIG. 11



Bohr estableció que los electrones solo podían circular en órbitas concretas o niveles de energía específicos, representados con la letra n en la figura. El estado electrónico (nivel) de menor energía es $n=1$, y es el más próximo al núcleo. Cuando un electrón recibe energía se dice que está excitado, y entonces salta a un nivel orbital superior. Cuando retorna a niveles inferiores, desprende energía en forma de fotones.

gética. El cambio de energía se produce cuando los electrones se mueven de un nivel a otro. Eso ocurre cuando los electrones absorben energía, por ejemplo, procedente de una fuente externa, de modo que pasan a estar excitados y realizan un salto cuántico a una órbita electrónica más externa. Si la energía es suficiente, pueden llegar a escapar del átomo, tal como había explicado Einstein mediante el efecto fotoeléctrico. Y al contrario, cuando se remite energía es porque los electrones excitados retornan a una capa cuántica de un nivel energético inferior y más próxima al núcleo (figura 11).

La audacia y el atrevimiento de la teoría de Bohr fueron extraordinarios. Su teoría fue recibida con cautela, pero, sin lugar a dudas, era capaz de explicar un gran número de fenómenos. Al considerar los saltos de energía de los electrones, sus fórmulas recordaban las líneas espectrales del átomo de hidrógeno observadas por Johann Jakob Balmer en el siglo XIX. Cuando los electrones excitados retornan a su estado de equilibrio, tienen que emitir energía o absorberla. El cálculo de las frecuencias de estos intercambios era idéntico a la fórmula de Balmer. Bohr lograba con su modelo hallar una explicación para las líneas espectrales.

DESDE LAS ANTÍPODAS

La gesta de Rutherford para desentrañar el núcleo atómico es aún más increíble si se tiene en cuenta que nació en Nueva Zelanda, entonces una alejada colonia del Imperio británico. Eso no fue impedimento para que Rutherford tuviera acceso a educación supe-

DOS VIDAS NO TAN PARALELAS

Albert Einstein y Ernest Rutherford encarnan dos maneras diferentes de abordar la física. Einstein era el físico teórico solitario, ajeno a todo lo que le rodeaba excepto sus elucubraciones. Rutherford, por el contrario, era un físico experimental que, además, desconfiaba de cualquier hipótesis que no estuviera respaldada por los hechos. Para Rutherford, los físicos teóricos se dedicaban a «jugar con símbolos», mientras que los físicos experimentales «nos dirigimos a los sólidos hechos reales de la naturaleza». Rutherford era un diestro jugador de rugby, mientras que Einstein prefería ensimismarse tocando el violín o dar largos paseos solitarios en su barca (con el riesgo añadido de que no sabía nadar, lo que puso en más de una ocasión su vida en peligro). A Rutherford le gustaba trabajar en equipo e incluso muchos de sus colaboradores lo llamaban «el Profesor». Cualquiera de sus estudiantes sabía que cuando irrumpía en el laboratorio entonando una canción —especialmente *Onward, Christian Soldiers*, el himno inglés del siglo XIX—, eso significaba que todo estaba en orden. Y aseguraba que maldecir durante los experimentos facilitaba que se lograra el éxito. Era temperamental y en ciertos momentos podía llegar a perder los nervios, pero sobre todo fue un científico inspirador y un trabajador infatigable, y hasta once de sus colaboradores, entre los que destacan Niels Bohr, Otto Hahn o Frederick Soddy, acabaron obteniendo un premio Nobel. Bohr, por ejemplo, rememoraba a Rutherford señalando que «aunque siempre estaba intensamente ocupado en los progresos de su propio trabajo, tenía la paciencia de escuchar a los investigadores jóvenes cuando se daba cuenta de que tenían una idea, por modesta que fuera». El propio Einstein consideraba que Rutherford era el segundo Newton. Rutherford, en cambio, no guardaba las mismas simpatías por el trabajo teórico que ejemplificaba Einstein. Solía decir a sus colaboradores: «¡Que no oiga a nadie hablando sobre el universo en mi departamento!».



Albert Einstein (sentado en la primera fila) y Ernest Rutherford (orador) en una petición de fondos del Consejo de Ayuda Académico, en el Royal Albert Hall de Londres, en 1933.

rior, recibiera noticias de los últimos descubrimientos científicos —aprovechando el excelente y efectivo sistema de publicaciones científicas que ya estaba en funcionamiento—, e incluso que se le diera la oportunidad de estudiar en los mejores laboratorios del Reino Unido.

Ernest Rutherford nació en el seno de una familia humilde el 30 de agosto de 1871. Apenas hacía un siglo que James Cook —el explorador del Pacífico— había llegado a esas tierras habitadas por los maoríes, lo que hizo que pasaran a formar parte de la Corona británica (se trataba además de uno de los últimos lugares de la Tierra sin colonizar). Los primeros colonos aún tardarían en llegar. En uno de los barcos que alcanzaron la costa neozelandesa en la década de 1840 se encontraba George Rutherford junto a un niño de cinco años, James, que con el paso del tiempo acabaría siendo el padre de Ernest Rutherford.

La madre de Ernest, Martha Thomson, era una maestra de escuela nacida en Inglaterra. Le gustaba tocar el piano, un signo de cultura y distinción en aquellas tierras tan lejanas y apartadas de la civilización. Ernest fue el cuarto de doce hermanos. Vivían a las afueras de Nelson, una ciudad portuaria de unos cinco mil habitantes. Su padre se dedicaba al cultivo de maíz. A Ernest le gustaba construir artefactos, reparar objetos, cazar y pescar.

Con quince años logró acceder con una beca al colegio Nelson, donde le proporcionaron una educación básica en lengua y matemáticas. También se aficionó a jugar a rugby. Gracias a premios y becas pudo seguir formándose posteriormente en la Universidad de Canterbury, en Christchurch, una institución que solo contaba con siete profesores y donde logró la máxima distinción en física y astronomía. Durante esa época, Ernest sufrió la pérdida de dos hermanos que salieron en barca a navegar y jamás regresaron, un hecho que cambió el carácter de su madre para siempre.

La familia se fue a vivir a la Isla Norte, de modo que Ernest se vio obligado a hospedarse en una pensión para seguir estudiando. Allí conocería a la hija de la propietaria, Mary Newton, de la que rápidamente se enamoraría y pediría en matrimonio. Sin embargo, Mary era consciente de que ese paso supondría un estorbo para su carrera, así que acordaron esperar a finalizar los

estudios y a que adquiriera una posición en el mundo académico para casarse.

Rutherford obtenía sus ingresos dando clases y dedicaba parte del tiempo restante al estudio de la electricidad. Ernest pudo leer el artículo de Heinrich Hertz de 1888 en el que se anunciaba el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, y quiso saber si podía crear un dispositivo para captar tales ondas. Diseñó experimentos donde mostraba que unas de esas ondas —en la actualidad llamadas «ondas de radio»— eran capaces de atravesar paredes y puertas de metal, y los mostró ante estupefactos estudiantes y profesores. La publicación en 1894 de estos experimentos le granjeó una cierta fama.

«Acabo de leer alguno de mis primeros trabajos y, sabes, al acabar me dije a mí mismo: "Rutherford, chico, eras un tipo condenadamente inteligente".»

— **Ernest Rutherford en 1911.**

Rutherford había alcanzado la mayor cima académica que podía ofrecerle Nueva Zelanda. Cuando parecía que no había nada más allá de lo que le ofrecía ese país, llegó una oportunidad inesperada. Había postulado para una beca del Reino Unido llamada «de la Gran Exposición de Londres de 1851», porque se financiaba con el dinero recaudado en esa ocasión. El tribunal había descartado su candidatura en primera instancia al preferir a otro candidato, químico y con mayor experiencia. Sin embargo, el químico desestimó la oportunidad porque estaba a punto de casarse. Cuando Ernest se encontraba en casa de sus padres arando en un campo de patatas, llegó un telegrama con la ansiada noticia. La oportunidad había recaído finalmente sobre él. Exclamó: «¡Esta es la última patata que cavo!». De este modo, Rutherford llegó a Inglaterra para conquistar el átomo.

CAPÍTULO 2

Alfa, beta y gamma

Junto con Becquerel y Marie Curie, Rutherford comparte el mérito de haber desentrañado la naturaleza de la radiactividad. Llegó a la conclusión de que se componía de un conjunto de radiaciones que se diferenciaban entre sí por su carga eléctrica y su poder de penetración en la materia: las partículas alfa, cuya carga era positiva y tenían un escaso poder de penetración, y las partículas beta, mucho más penetrantes y de carga negativa. Rutherford también contribuyó decisivamente a la detección de las radiaciones gamma.

Cuando Rutherford arribó al Reino Unido en 1895 recién llegado de las antípodas, aún se ignoraba la existencia de la radiactividad. Pero en cuestión de pocos años, Rutherford pasó a ser uno de los científicos más brillantes en este nuevo campo.

A pesar de contar con la beca de la Exposición de 1851, Rutherford tuvo que pagarse de su propio bolsillo el pasaje de barco desde Nueva Zelanda. Durante los dos meses que duró el trayecto, inició una correspondencia con su prometida —Mary Newton— que se prolongaría a lo largo de los años en que estuvieron separados y que ha sido una valiosa fuente de información de primera mano para conocer las vicisitudes que rodearon al científico durante un período crucial de su vida.

Rutherford había optado por incorporarse al equipo liderado por Joseph John Thomson, el director del laboratorio Cavendish de Cambridge en aquella época. De nuevo la suerte había sonreído a Rutherford, dado que ese mismo año se había abolido la estricta regulación de Cambridge que impedía el acceso a su institución a estudiantes que no hubiesen desarrollado sus estudios en la misma. De esta manera, Rutherford pasó a ser el primer estudiante de doctorado de Cambridge foráneo. Ello supuso a la práctica una dificultad añadida en su proceso de adaptación, dado que el resto de los estudiantes y la mayoría de los profesores no lo consideraban como uno de los suyos.

RUTHERFORD EN CAVENDISH

En un principio, Ernest siguió investigando la captación de señales electromagnéticas, un antecedente de la radio que había impresionado a profesores y estudiantes en Nueva Zelanda. Rutherford había construido cada uno de los componentes de su aparato, incluidas unas baterías. Su tutor Thomson y otros responsables de la universidad estaban expectantes por las investigaciones del nuevo estudiante. En su autobiografía, J.J. Thomson hizo referencia a estas primeras andanzas de Rutherford en la universidad:

> Logró, poco después de iniciar su trabajo en la universidad, el récord para la telegrafía de larga distancia, al enviar con éxito mensajes desde el laboratorio a las habitaciones, que se encuentran a poco más de un kilómetro de distancia.

Aunque aquel era un invento prometedor y con grandes posibilidades de aplicación (lo que además se podía traducir en una

LA CARRERA POR LA TELEGRAFÍA SIN HILOS

Guglielmo Marconi (1874-1937) fue un físico italiano al que se le atribuye la invención del telégrafo sin hilos. Sus primeros experimentos para transmitir señales telegráficas sin hilos datan de 1884, aunque la escasa repercusión que obtuvieron en Italia le decidió a irse al Reino Unido, donde presentó sus primeras patentes en 1896. Colaboró con un ingeniero de la compañía de correos y muy pronto Marconi pudo fundar su propia compañía. En 1901 logró transmitir una señal de radio que cruzó al otro lado del océano Atlántico, y en 1909 recibió el premio Nobel de Física por las importantes implicaciones de esos descubrimientos. De forma casi simultánea, Rutherford, en Nueva Zelanda, y Marconi, en Italia, estuvieron desarrollando aparatos para captar señales de radio, lo que se conocía como telegrafía sin hilos. Rutherford construyó su aparato para captar señales de radio independientemente de los progresos de Marconi (existen dudas sobre la paternidad de esta invención). En sus demostraciones, Rutherford logró despertar la curiosidad de numerosos científicos de

importante fuente de ingresos), pronto pasó a un segundo plano entre las investigaciones de Rutherford al conocerse los rayos X.

LOS RAYOS DE RÖNTGEN Y DE BECQUEREL

Según Rutherford, la revolución cuántica se inició en 1896, cuando Henri Becquerel descubrió la radiactividad. Este descubrimiento fue totalmente inesperado, ya que nada en la física del siglo XIX hacía prever que el seno de la materia contuviera, en forma de fuente, tal cantidad de energía. Sin embargo, para entender el contexto es preferible remontarse un año antes, cuando Wilhelm Conrad Röntgen descubrió los rayos X.

Röntgen, que era profesor de la Universidad de Würzburg (Alemania), estaba investigando el poder de penetración de los rayos catódicos, y, en concreto, quería comprobar si podían atravesar aluminio. Durante el experimento mantuvo las luces apagadas y colocó un cartón negro recubriendo el tubo para impedir

la universidad, que rápidamente vieron que ese invento tenía múltiples y estratégicas aplicaciones, como por ejemplo comunicarse con una embarcación desde tierra. En 1896 pudo presentar su invención ante la Royal Society, donde explicó el funcionamiento de su detector de ondas de radio. Las numerosas aplicaciones le permitieron soñar con proveerse del dinero que necesitaba para contraer matrimonio. Sin embargo, a pesar de las posibilidades de negocio (que Marconi sí supo aprovechar), la curiosidad que le despertó el descubrimiento de los rayos X hizo que todos sus sueños crematísticos pasaran a un segundo plano.



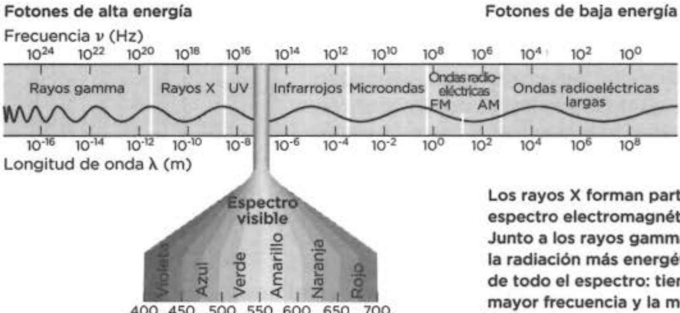
Guglielmo Marconi hacia 1937.

LOS RAYOS X

Los rayos X son un tipo de radiación electromagnética que se caracteriza por su alta frecuencia (es decir, tienen alta energía). Se pueden originar cuando partículas con carga eléctrica sufren una fuerte aceleración o desaceleración. Aunque se trata de rayos invisibles a los ojos humanos, las placas fotográficas son sensibles a su radiación, de manera que dejan constancia de su paso, se imprimen. Así fue como Röntgen pudo observarlos por primera vez: se formaron en un tubo de Crookes, donde se aceleran electrones al someterlos a un alto voltaje, y posteriormente impactaron en unas placas fotográficas. En la actualidad, los rayos X se producen de forma controlada en los llamados aceleradores de partículas como el sincrotón, donde partículas aceleradas emiten lo que se llama luz de sincrotón, que incluye radiación ultravioleta, rayos X, etc.

Aplicaciones

Entre la variedad de aplicaciones de los rayos X destacan las referidas a la práctica médica. La más inmediata, y que sigue siendo ampliamente utilizada, es como herramienta de diagnóstico para visualizar el interior del cuerpo y en especial sus huesos. Hoy día, además de estas partes más densas, la tomografía computerizada también aprovecha rayos X para observar órganos y otras estructuras corporales. Debido a que es una radiación de tipo ionizante, se aprovecha su capacidad de dañar células vivas para combatir células cancerosas —lo que hace que recibir esta radiación en dosis elevadas o de forma incontrolada sea sumamente nocivo—. En la industria de la alimentación, se utiliza para prolongar la conservación de los alimentos: se irradian para detener la proliferación de bacterias. Como los rayos X tienen una longitud de onda minúscula y del orden del tamaño de los átomos, sirven también para estudiar cristales. Por ejemplo, la técnica de difracción de rayos X permitió a Rosalind Franklin (1920-1958) fotografiar el ADN que en 1953 permitió a James Watson y Francis Crick desentrañar su estructura en doble hélice.



Los rayos X forman parte del espectro electromagnético. Junto a los rayos gamma, son la radiación más energética de todo el espectro: tienen la mayor frecuencia y la menor longitud de onda.

que los rayos «escaparan». Cuando conectó el tubo de rayos catódicos, por casualidad se dio cuenta de que una pantalla que había a lo lejos con material fluorescente empezó a brillar. Los destellos desaparecían nada más apagar la corriente del tubo. Era evidente que del tubo emergían unos rayos de naturaleza distinta a los catódicos, ya que estos últimos en principio debían ser absorbidos por el cartón.

Conrad Röntgen descubrió así que estos rayos tenían una característica muy particular: podían atravesar objetos sólidos. Los llamó «rayos X» porque desconocía su procedencia —aunque también se generalizó llamarlos «rayos Röntgen» en su honor—. Entonces se le ocurrió crear una de las imágenes de rayos X más famosa de la historia: la mano izquierda de su mujer (en la que se puede observar un anillo). Esta fotografía circuló por todos los laboratorios de Europa y despertó un gran interés tanto entre la comunidad científica como en la sociedad en general. Para los científicos era prioritario saber cuál era la naturaleza, el origen y las características de esos rayos. Las prometedoras utilidades, que tomaron cuerpo principalmente en el campo médico, tampoco pasaron desapercibidas para nadie.

EL URANIO

Uno de los científicos que se sintió fascinado con el descubrimiento de los rayos X fue Antoine-Henri Becquerel, el director del Museo de Historia Natural de París en 1892. Becquerel era descendiente de una saga de científicos vinculados al museo, y su padre había sido un experto en minerales fluorescentes. Por esa razón, la institución contaba con una importante colección de este tipo de minerales. Röntgen había sugerido que los rayos X podían estar vinculados con la fluorescencia, por lo que Becquerel se vio en una posición inmejorable para poder explorar esta hipótesis. Se trataba de una conjetura errónea, pero que condujo a un descubrimiento crucial.

A Becquerel le había llamado la atención principalmente la intensidad de fluorescencia de un mineral compuesto por sales de uranio (en concreto sulfato potásico de uranio, que en la época se

usaba para colorear cerámica y vidrio). El uranio, que puede presentar actividad de fluorescencia de forma natural, parecía ser un buen inicio para su investigación. En 1896, Becquerel tomó la sal de uranio y la colocó sobre una placa fotográfica (lámina de vidrio recubierta de una capa de material sensible a la luz) que previamente había envuelto en papel negro. Al exponer el mineral a los rayos solares, se provocaría la fluorescencia. Como el papel negro tenía la misión de impedir que los rayos de luz visible impactaran en la placa fotográfica, si en esta se registraba algun efecto, tenía que tratarse de rayos X.

«Una de las hipótesis que se presenta a la mente naturalmente sería suponer que estos rayos, cuyos efectos tienen una gran similitud con los producidos por los rayos estudiados por P. Lenard y M. Röntgen, son rayos invisibles...»

— Antoine-Henri Becquerel.

Tras algunas horas de exposición a los rayos solares, el mineral se tornó fluorescente, y al desvelar la placa fotográfica, Becquerel comprobó con satisfacción que, tal como había pronosticado, la imagen del mineral había quedado impresa. Su tesis se había confirmado de forma rotunda. Una semana más tarde quiso repetir el experimento, pero al estar nublado, guardó el uranio y la placa fotográfica en un cajón para usarlos otro día. En este hecho aparentemente intrascendente estuvo la clave de su gran descubrimiento.

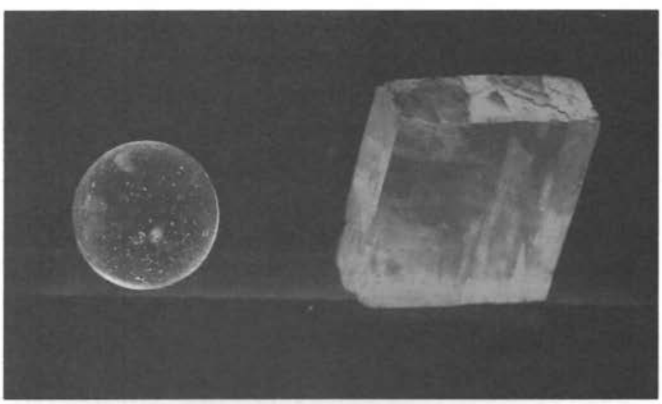
Cuando días más tarde fue a buscar la placa y el mineral, observó con sorpresa que se había dibujado de nuevo el contorno del mineral. El mineral había permanecido a oscuras dentro del cajón, por lo que la impresión no podía ser debida a la fluorescencia. Después de realizar más experimentos para comprobar que no fuera una casualidad —por ejemplo, que el uranio fuera capaz de emitir fluorescencia por un tiempo más prolongado de lo conocido—, finalmente tuvo que aceptar que su hipótesis original se derrumbaba. Becquerel siguió convencido de que la placa no había captado otra cosa que rayos X, pero su naturaleza tenía que ser diferente. El resultado de su descubrimiento se presentó en la

Académie des Sciences de París en 1896, aunque nadie en aquel momento le dio gran importancia.

En realidad, Becquerel había descubierto, sin darse cuenta, la radiactividad. Mientras que en la generación de rayos X era necesario usar un gran voltaje eléctrico, el origen de los rayos

FLUORESCENCIA Y FOSFORESCENCIA

La fluorescencia es una característica que tienen algunos objetos de absorber energía —proveniente de la luz visible o rayos UV, rayos X, por ejemplo— del entorno y luego emitirla a una longitud de onda distinta a la originaria, en el rango visible y de forma casi instantánea (en unos 10^{-8} segundos). Se trata de un fenómeno que se produce a cualquier temperatura y, por tanto, son minerales que brillan incluso a temperatura ambiente; no es pues un efecto térmico, como la incandescencia o termoluminiscencia. La fluorescencia deja de producirse en cuanto la fuente de energía que excitaba al mineral desaparece. Al igual que la fluorescencia, la fosforescencia también se encuentra de forma natural como reemisión de luz de minerales, aunque los minerales fosforescentes logran prolongar la emisión de luz hasta después de que la fuente de luz se retire, y el período de reemisión de luz puede durar desde fracciones de segundo hasta años. Los materiales fosforescentes, por tanto, son capaces por sí solos de brillar en la oscuridad.



Irradiadas con luz ultravioleta (UV) de onda corta, la bola de uranio de la izquierda es fluorescente, mientras que la calcita presenta fosforescencia.

de Becquerel era desconocido y fue una incógnita que fascinó a numerosos científicos.

LA IONIZACIÓN Y LOS RAYOS X

Cuando saltó la noticia del descubrimiento de los rayos X, Thomson quiso ponerse de forma inmediata a estudiarlos, y propuso a su ayudante que lo secundara en esta tarea. En mayo de 1896, Rutherford escribió a su futura mujer explicándole esta nueva línea de investigación:

> Thomson ha estado muy ocupado estudiando el nuevo método de fotografía descubierto por el profesor Röntgen [...]. El profesor está tratando de descubrir la causa real y la naturaleza de las ondas y su objetivo es encontrar la teoría de la materia antes que nadie, dado que actualmente casi todos los profesores de Europa están en pie de guerra con esta cuestión.

En 1896, Rutherford y Thomson mostraron ante la comunidad científica que los rayos X ionizaban los gases, es decir, un gas se convertía en mejor conductor de electricidad cuando se radiaba con rayos X. Esta propiedad, que se empezó a utilizar para su identificación, era compartida con otros tipos de radiación, por lo que se sugirió que los rayos X podían ser un tipo de radiación electromagnética. El físico alemán Max von Laue (1879-1960) pudo demostrar esta hipótesis casi dos décadas más tarde.

Thomson se volcó en el estudio de los rayos catódicos y su trabajo culminó —tal como se ha explicado en el capítulo anterior— afirmando que los rayos catódicos eran en realidad partículas de carga negativa que surgían de los átomos. Inmediatamente después de este descubrimiento, Thomson propuso su modelo atómico.

Mientras Thomson seguía estudiando el átomo, Rutherford continuó investigando la ionización de gases con otros tipos de radiación, como la ultravioleta, e hizo lo mismo con los rayos X una vez que tuvo noticias de su descubrimiento. Pero no sería el único



FOTO SUPERIOR:
Estudiantes del laboratorio Cavendish, en 1898. En el centro de la primera fila (con los brazos cruzados) aparece J.J. Thomson. En la segunda fila, Rutherford es el cuarto por la izquierda.

FOTO INFERIOR IZQUIERDA:
La primera radiografía que fotografió Röntgen fue la de la mano de su esposa Berta.

FOTO INFERIOR DERECHA:
El físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen.





que se había sentido atraído por el descubrimiento de Becquerel. En París había una pareja, Pierre y Marie Curie, que también estaban muy interesados en este tipo de fenómenos ligados a la radiación. Rutherford y los Curie compartían unos intereses científicos que les llevó a colaborar pero también a competir.

LA RADIACTIVIDAD: LOS CURIE

Maria Skłodowska (1867-1934) nació en Varsovia. Con el fin de poder acceder a la universidad (en Polonia las mujeres tenían

MARIE CURIE



Marie Curie hacia 1920.

Hija menor de cinco hermanas, Marie Curie nació en Varsovia (cuando Polonia formaba parte del Imperio ruso) en 1867 y posteriormente tomó la nacionalidad francesa. Fue la primera mujer en doctorarse en Francia y en obtener el premio Nobel, además de ser la primera persona en lograr este honor por dos ocasiones. Su padre era profesor de matemáticas y física, y desde su infancia destacó siempre en los estudios. Durante su juventud tuvo que trabajar para que una de sus hermanas pudiera ir a París a estudiar medicina, con el acuerdo de que posteriormente ella le devolvería el favor. En 1891 pudo finalmente matricularse en la Sorbona de París, donde logró ser la primera de su promoción en física a pesar de sufrir constantes penurias económicas. Se licenció en física en 1893 y en matemáticas al año siguiente. Al empezar a trabajar en un laboratorio de investigación conoció al que sería su futuro marido, Pierre Curie. Se casaron en una ceremonia muy sencilla en 1895, y pronto constituyeron un equipo de

prohibido estudiar) emigró a Francia, donde se convertiría en la primera mujer en obtener el doctorado de física en la prestigiosa Universidad de la Sorbona de París. Tras casarse con el también científico Pierre Curie, tomó de este su apellido.

Al considerar la elección de un tema para su doctorado, a Marie le llamaron la atención las emisiones del uranio descubiertas por Becquerel. Para detectar esos rayos, este había usado placas fotográficas, un sistema útil, pero que no permitía cuantificar la intensidad de la radiación. Por esa razón, Marie y Pierre Curie prefirieron decantarse por el estudio de las radiaciones basado en sus propiedades eléctricas, ya que de este modo sí que serían cuantitativos. Rutherford tomó una aproximación metodológica semejante.

trabajo que les depararía grandes éxitos. Su dedicación a la investigación no les impidió tener dos hijas: Irène y Ève, nacidas en 1897 y 1904 respectivamente. En 1898 descubrieron el polonio y seguidamente el radio, y también detectaron que el torio era radiactivo. Para poder establecer el peso atómico del radio fue necesario servirse de toneladas de pechblenda. Tuvieron que usar peligrosos ácidos para disolver el metal en grandes recipientes, y durante un proceso que duró años estuvieron sometidos a unos vapores muy tóxicos. En 1903, Becquerel, Pierre Curie y Marie Curie fueron reconocidos con el premio Nobel de Física por su descubrimiento de la radiactividad.

Un giro inesperado

Pierre logró una cátedra de Física en la Sorbona, pero su muerte repentina en 1906 —atropellado por un carromato— significó un vuelco en la carrera de su mujer. Marie, que solo había podido aspirar a enseñar ciencias en un instituto de secundaria, no aceptó la pensión de viudedad que le ofreció el gobierno, pero sí reclamó que se le otorgara el puesto que ocupaba su marido en la universidad, lo que la convirtió en la primera mujer que ocupaba una cátedra en la historia de la institución. En 1911, de nuevo fue galardonada con el premio Nobel, esta vez de Química, por haber logrado aislar el radio. Al estallar la Primera Guerra Mundial, Marie, junto con su hija Irène, se volcaron en desarrollar la técnica de la radiografía de rayos X para tratar a los heridos. Más tarde, en 1935, Irène lograría también el premio Nobel de Química. Posteriormente, Marie siguió impulsando las aplicaciones médicas de sus descubrimientos. Marie Curie murió el 4 de julio de 1934, y desde 1995 sus cenizas se encuentran en el Panteón de París como reconocimiento a su labor científica.

Para hacer las mediciones, Marie se sirvió de una adaptación del electroscopio o, mejor dicho, electrómetro, puesto que es más preciso que el electroscopio que había inventado su marido. Pierre había aprovechado el efecto piezoeléctrico de los cristales de cuarzo —materiales que por su estructura cristalina presentan una dependencia en las propiedades eléctricas bajo tensión mecánica, compresión/expansión— para construir un aparato mucho más sensible que el usual. Como el uranio ionizaba los gases hasta diferentes grados de conducción eléctrica, el electrómetro de cuarzo piezoeléctrico resultaría útil para detectar las sutiles diferencias en la intensidad de carga eléctrica inducida en los gases.

«No hay que olvidar que cuando se descubrió el radio, nadie sabía que resultaría útil en los hospitales. Se trataba de trabajo de ciencia pura. Y esta es una prueba de que la actividad científica no debe valorarse desde el punto de vista de su utilidad directa, sino que hay que llevarla a cabo por sí misma, por su belleza...»

— Marie Curie.

Los Curie estaban convencidos de que la radiación de Becquerel tenía su origen en el ambiente. Se trataba de una radiación que no podía originarse espontáneamente desde el interior del mineral, sino que existía una causa externa. La tarea consistía, por tanto, en identificar eso. De manera sistemática, hicieron pruebas que les permitieron descartar que las radiaciones solares estuvieran implicadas. Tampoco el estado físico o químico del elemento parecía tener relación con este fenómeno. El único factor que parecía alterar la capacidad de ionizar los gases era la cantidad de muestra de uranio empleada. Todo apuntaba a un origen interno del propio uranio, pero los investigadores se resistían a aceptar esta conclusión. En ese momento, el científico alemán Gerhard Carl Schmidt (1865-1949) descubrió que el torio emitía una radiación similar y Rutherford también llegó a la misma conclusión de forma independiente. El problema se hacía más complejo.

En 1898, los Curie denominaron como «radio-actividad» a los rayos ionizadores de los dos materiales conocidos hasta el momento (nombre que nacía del hecho de que se referían a la actividad de los elementos en alusión a las señales captadas en sus electrómetros). Ponerles nombre no era suficiente: era necesario indagar más sobre su naturaleza y averiguar si había más elementos que emitieran radiactividad.

EL DESCUBRIMIENTO DEL RADIO Y EL POLONIO

La pechblenda era un viejo conocido de los químicos de la época. En el polvo que desprende este mineral, en 1789 el químico alemán Maarten Heinrich Klaproth había logrado reconocer el uranio, un nuevo elemento entonces, con cuyo nombre quiso homenajear el descubrimiento de Urano realizado ocho años antes.

Los Curie se interesaron inmediatamente por experimentar con pechblenda y Pierre observó que al comparar la actividad de un gramo de uranio con la de un gramo del mismo material disperso en pechblenda, este último mostraba una mayor actividad. Ello podía significar —como así fue— que el mineral escondía una fuente de radiación diferente nunca antes descubierta.

Tenía que tratarse de una fuente de radiación mucho mayor que la del uranio. Una pieza pequeña de pechblenda mostraba una gran actividad, de modo que si se trataba de un nuevo elemento radiactivo tenía que ser fácilmente detectable. Pero, por contra, se dieron cuenta de que se encontraba en muy poca concentración, por lo que necesitaban una gran cantidad de pechblenda para hallarlo. Tras realizar sucesivas separaciones químicas de los materiales, pudieron confirmar su sospecha, y en 1898 hacerla pública:

> Creemos, pues, que la sustancia que hemos retirado de la pechblenda contiene un metal no conocido hasta ahora, cercano al bismuto por sus propiedades analíticas. Si la existencia de este nuevo metal se confirma, proponemos que se denomine polonio, por el nombre del país de origen de uno de nosotros.

Al cabo de pocos meses, pudieron aislar otro elemento radiactivo al que llamaron radio. Marie Curie relató así el descubrimiento:

> Tuve ocasión de examinar un cierto número de minerales. Unos pocos de ellos mostraron actividad: eran aquellos que contenían uranio o torio. La actividad de estos minerales no habría tenido nada de sorprendente si hubiese estado en proporción a las cantidades de uranio o torio que contenían. Pero no era así. Algunos de estos minerales mostraron una actividad tres o cuatro veces mayor que la del uranio. Verifiqué cuidadosamente este sorprendente hecho, y no podía dudar de su veracidad. Especulando acerca de su motivo, me pareció que solo existía una explicación. En estos minerales debía haber, pensé, alguna sustancia desconocida muy activa.

La existencia del polonio y el radio tuvieron una confirmación independiente gracias al análisis espectroscópico, que mostró unas líneas de absorción que no pertenecían a ningún elemento conocido. Sin embargo, para la química de la época no se trataba de una confirmación suficiente. Era necesario salir de toda duda con la determinación del peso atómico de la nueva sustancia, lo que requería obtener dicha sustancia de forma muy pura. Es decir, iban a necesitar grandes cantidades de pechblenda. Por suerte, lograron que el gobierno austriaco les donara toneladas de pechblenda que transportaron hasta un pabellón donde se dispusieron a aislar el radio. Durante cuatro años de duro trabajo solo lograron obtener cien miligramos de radio, pero eso fue suficiente para lograr su objetivo y finalmente ser reconocidos por la comunidad científica.

RUTHERFORD EN MCGILL

Por su parte, Rutherford se dedicaba a la ionización de gases mediante radiación. Sin embargo, la beca llegaba a su fin, por lo que era preciso pensar en su futuro. En ese momento, la Universidad

McGill (Montreal, Canadá) pidió a Thomson que le recomendara a un científico para ocupar la cátedra Macdonald de Física (en honor a William Macdonald, rico empresario y comerciante de tabaco que regaló a la universidad el edificio de física más grande del mundo y apoyó financieramente la cátedra que llevaba su nombre). Thomson no tuvo dudas en recomendar encarecidamente a Rutherford, a pesar de su juventud. Iba a ser el responsable de un laboratorio que dispondría de considerables recursos, y además el puesto estaba dotado de una remuneración económica importante. Alejarse del centro de la actividad científica mundial, después de haberse encontrado en él aunque fuera como secundario, era decepcionante, pero la posibilidad de poner fin a las estrecheces económicas resultó decisiva para que aceptara el puesto. Esto suponía además que por fin la pospuesta boda con Mary Newton —que seguía esperándole en Nueva Zelanda— podría llevarse a cabo. Así explicó a su prometida su decisión final de ir a Canadá: «Regocíjate conmigo, amada niña mía, porque el matrimonio se cierne en la distancia».

> «De estos experimentos hay que concluir que la sustancia fosforescente en cuestión emite rayos que atraviesan el papel opaco.»
>
> — Henri Becquerel.

A miles de kilómetros de Cavendish, y con solo veintisiete años, Rutherford fue capaz de convertir Montreal en una de las capitales de la ciencia de la época, donde se sucederían algunos de los experimentos más fundamentales en torno a la radiactividad. Sus investigaciones en Canadá fueron las que finalmente le abrieron las puertas para recibir el Nobel. Nada más llegar, prosiguió con sus trabajos con los rayos X y los «rayos de Becquerel». Quería averiguar si se trataba de dos tipos de rayos emparentados y con características comunes. Rutherford intentó polarizar y refractar los rayos de Becquerel para estudiar si tenían las mismas propiedades de la radiación que manifestaban los rayos X. Aunque eso no lo logró, sí pudo observar que el uranio era capaz de ionizar los gases.

De los sucesivos análisis realizados por Rutherford, este llegó a una importante conclusión: los rayos procedentes de uranio no eran siempre iguales. Pudo establecer dos clases: los rayos alfa y los beta, que se distinguían por su diferente poder de penetración (véase en el anexo la desintegración alfa y beta).

RAYOS ALFA Y BETA

El experimento que le permitió a Rutherford llegar a la conclusión de que los rayos procedentes de uranio no eran de un solo tipo fue el siguiente: dispuso dos placas de cinc en paralelo, conectó una de ellas a la corriente eléctrica, y sobre ella colocó uranio. La otra placa estaba unida a un electrómetro, y entre ambas había un gas. Gracias a la capacidad ionizadora de las emanaciones del uranio, el gas tenía que acabar conduciendo la electricidad, y con el electrómetro podría medir cierta intensidad de la corriente. Como novedad, interpuso entre las placas unas láminas de aluminio, y observó que la corriente eléctrica disminuía. Aunque dispusiera láminas de diferente espesor, siempre se formaba corriente.

> «Una teoría que no se pueda explicar a un camarero no es, probablemente, muy buena.»
>
> — Ernest Rutherford.

De este experimento dedujo que en el uranio existía una radiación que quedaba absorbida por las láminas de aluminio, mientras que otra radiación, mucho más penetrante, lograba traspasarla. Repitió el experimento empleando esta vez torio y los resultados fueron similares. También usó distintos materiales, desde vidrio hasta madera, para usarlos como filtros de los rayos. Observó asimismo que los rayos llamados alfa, aunque eran menos penetrantes, tenían una capacidad de ionizar los gases mucho mayor que los rayos beta.

En 1899, Rutherford publicó un artículo, el primero desde su llegada a Canadá, en el que describía este experimento. Estas fueron sus conclusiones:

ESPIRITISMO Y RADIACTIVIDAD



Imagen basada en la descripción de William Crookes con la médium Florence Cook en el suelo, y el espíritu materializado de la fallecida Katie King (nombre que la médium dio a esa supuesta materialización).

Durante el siglo XIX se vivió un auténtico renacimiento del espiritualismo. Personas de toda condición, incluso con formación superior y universitaria —entre los que había también un gran número de científicos— estaban convencidos de poder contactar con habitantes de una realidad paralela y espíritus fallecidos. Tales ideas se habían visto alentadas paradójicamente por el propio desarrollo científico de la época, que aludía a elementos invisibles e inalcanzables para los sentidos humanos como los campos electromagnéticos. Con el descubrimiento de los rayos X, hubo oportunistas que no dejaron escapar la ocasión de afirmar que con estos rayos podían fotografiar el alma. Entre el espiritismo, que creía que era posible contactar con una realidad oculta en la que habitaban los muertos, y la ciencia, que cada vez descubría realidades invisibles a los sentidos, parecía establecerse un vínculo. Los rayos X y la radiactividad parecían elementos que enlazaban con la otra realidad, por lo que muchos científicos se lanzaron a explorar lo oculto. En las sesiones espiritistas que se organizaron por toda Europa durante el siglo XIX era posible ver a científicos como el químico inglés William Crookes, que realizó importantes contribuciones al estudio de los rayos catódicos; a Camille Flamarion, uno de los astrónomos y divulgadores científicos más importantes de la época; o a Alfred Russel Wallace, quien propuso la selección natural simultáneamente a Darwin. También eran fervientes defensores del espiritismo autores como el escritor Arthur Conan Doyle. Sin embargo, es necesario constatar que otros científicos, como Faraday, rápidamente se dieron cuenta de que los extraordinarios fenómenos a los que aludían los espiritistas, como el movimiento de objetos en una mesa, era siempre provocado intencionadamente por los propios espiritistas o, involuntariamente, por los asistentes a este tipo de ceremonias, por lo que perdieron rápidamente cualquier interés en estos asuntos.

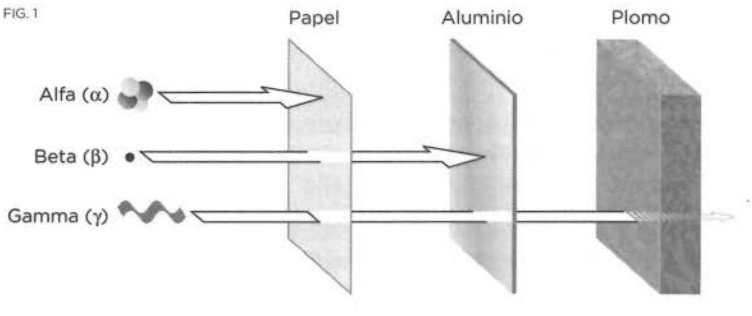
> Estos experimentos demuestran que la radiación del uranio es compleja y que al menos están presentes dos tipos distintos de radiación: una que es absorbida muy fácilmente, que por conveniencia será denominada *radiación alfa*, y la otra, de un carácter mucho más penetrante, que será denominada *radiación beta*.

Este fue el primer contacto con los rayos alfa, una relación que se mantuvo a lo largo del resto de su carrera científica y que le reportó sus éxitos más extraordinarios, como el hecho de descubrir, tal como se ha explicado en el capítulo anterior, el núcleo atómico. Rutherford había mostrado que la radiactividad se componía de varios tipos de radiación, unos con un mayor poder de penetración que otros. Sin embargo, la esencia del problema de la radiactividad continuaba siendo una incógnita: «La causa y origen de la radiación emitida constantemente por el uranio y sus sales todavía continúa siendo un misterio».

LA RADIACIÓN GAMMA

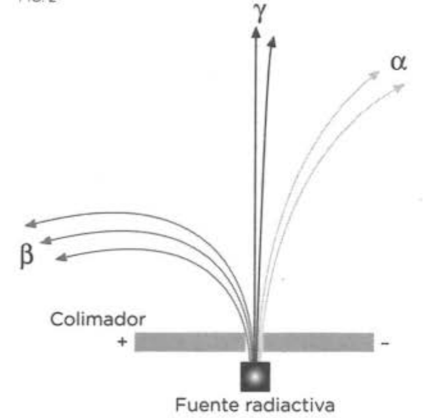
Así como Rutherford fue capaz de distinguir entre las radiaciones alfa y las beta, el mérito de descubrir las radiaciones gamma hay que atribuírselo al científico francés Paul Villard. En 1900, en unos experimentos realizados en París con radio —con material que le había sido donado por los Curie—, Villard pudo observar que una

FIG. 1



radiación desconocida era capaz de traspasar cualquier lámina de metal, e incluso de plomo de algunos centímetros de grosor. Es decir, existía una radiación que tenía un poder de penetración incomparablemente mayor que el manifestado por los rayos alfa o los beta. Entre otras características, Villard observó que esta radiación no se desviaba ante campos magnéticos. Sin embargo, confundió estos rayos con los rayos X (error por otro lado fácil de cometer dado que se trata en ambos casos de radiaciones muy energéticas).

FIG. 2



Al tener cargas eléctricas de distinto signo, las trayectorias de las partículas alfa y beta son divergentes bajo campos eléctricos. En cambio, la radiación gamma prosigue en línea recta, dado que es eléctricamente neutra.

Rutherford, en el año 1902, se hizo eco de las investigaciones de Paul Villard para interpretarlas correctamente:

> Todas las sustancias radiactivas permanentes, uranio, torio y radio, emiten dos tipos de rayos, uno fácilmente absorbible y que no es desviado por un campo magnético, y otro de carácter más penetrante y que se desvía en un campo magnético. En adición a estos dos rayos, Villard hizo notar por primera vez, utilizando un método fotográfico, acerca de la existencia de unos rayos muy penetrantes procedentes del radio, que no se desviaban en presencia de un campo magnético. Este resultado fue confirmado por Becquerel.

Finalmente, a estos rayos se les dio el nombre de *rayos gamma* (figura 1).

Como las radiaciones alfa están formadas por núcleos de helio con una gran masa en comparación por ejemplo al electrón, son absorbidas por una hoja de papel o por la palma de la mano. Las radiaciones beta básicamente son electrones, apenas tienen masa, de modo que pueden adquirir mayor velocidad que las partículas alfa con la misma energía, y por tanto su poder de penetración es mayor debido a una menor probabilidad de interacción

con la materia. Las radiaciones gamma son las más penetrantes, ya que constituyen las radiaciones con la longitud de onda más corta y más energéticas de todo el espectro electromagnético. No se conoce que exista un límite superior para las energías de rayos gamma. Marie Curie dibujó años más tarde un diagrama como el reproducido en la figura 2 para mostrar el efecto del campo magnético en los distintos tipos de rayos.

CAPÍTULO 3

La desintegración radiactiva

Rutherford descubrió la existencia de elementos radiactivos que se desintegraban de modo que se acababan transformando en otros elementos químicos. Mediante la desintegración atómica se explicaba la radiactividad. Entre otras aportaciones implícitas, Rutherford introdujo la noción de vida media de un elemento, y halló que este concepto podía aplicarse a la datación o la determinación de la edad de la Tierra.

La radiactividad fue el eje principal de los estudios llevados a cabo por Rutherford mientras estuvo en Canadá. Ernest realizó sus investigaciones simultáneamente a las de los Curie en Francia. La competencia originada entre estos científicos era palpable y reconocida por ellos mismos, tal como queda reflejado en este fragmento de una carta enviada por Rutherford a su madre:

> Estoy ahora ocupado escribiendo artículos para su publicación. Tengo que publicar mi trabajo actual tan rápidamente como sea posible para continuar en la carrera. Los mejores esprínteres en este camino de investigación son Becquerel y los Curie en París, que han realizado un trabajo muy importante en torno a los cuerpos radiactivos a lo largo de los últimos años.

HACIA LA COMPRENSIÓN DE LA RADIACTIVIDAD

A pesar de ser un campo de conocimiento nuevo, varios equipos de investigadores analizaron la radiactividad en Alemania y en el Reino Unido. Fueron momentos de actividad científica frenéticos, de descubrimientos constantes y asombrosos que traían consigo nuevos interrogantes y modelos que a menudo contradecían el

saber aceptado hasta la fecha. Todo lo relacionado con la radiactividad, que había empezado con unos destellos en una placa fotográfica, fue adquiriendo cuerpo y tornándose cada vez más complejo. Al tiempo, la incertidumbre era cada vez más creciente, dado que cada nuevo descubrimiento abría un abanico de nuevas incógnitas.

En 1899, científicos alemanes observaron que la radiactividad, en lugar de ser una emisión de actividad constante en el tiempo, tal como se había creído en un principio, tendía a disminuir. Por esa misma época, empezó a quedar claro que la radiación beta consistía fundamentalmente en electrones, es decir, partículas cargadas negativamente (los corpúsculos que Thomson había identificado en 1897 como constituyentes fundamentales de todos los átomos). Nada se sabía, sin embargo, sobre la naturaleza de los llamados rayos alfa, un problema que pudiera parecer secundario, pero que en realidad sería clave para entender la radiactividad, tal como los acontecimientos pusieron en evidencia más tarde. Rutherford, por su parte, constató que los elementos radiactivos, además de la radiactividad alfa y beta, producían una emanación semejante al «vapor».

LAS EMANACIONES

En 1899, Rutherford solicitó a un profesor de ingeniería de la universidad llamado R.B. Owens que le ayudara a estudiar la radiación del torio. En sus primeros estudios, llegó a la conclusión de que había algo en el ambiente que alteraba los resultados de los experimentos. En ocasiones, la propia presencia de Rutherford en la sala parecía llegar a modificar los resultados. Se trataba de una posible evidencia de que la radiactividad quizá sí dependía del medio, tal como creían los Curie.

Sin embargo, Rutherford defendió la hipótesis de que estas «emanaciones», tal como las denominó, procedían de los propios elementos radiactivos, y que eran capaces de impregnar de radiactividad todo lo que hubiera a su alrededor. Esta sería la causa de que las mediciones se vieran afectadas. Tal como afirmó:

Compuestos del torio emiten continuamente partículas radiactivas de algún tipo, que retienen sus poderes radiactivos durante algunos minutos. Esta «emanación», como será denominada por brevedad, tiene la capacidad de ionizar el gas de su entorno y de atravesar capas delgadas de metales y, con gran facilidad, pasar a través de papel de un grosor considerable.

Las «emanaciones» serían su inmediato campo de estudio. Primero, las logró contener en un tubo, cuyas paredes rápidamente se volvían radiactivas. Era como si la radiactividad fuera contagiosa, de modo que en torno al torio todo se volvía radiactivo, aunque fuera por poco tiempo. ¿Cuál era la naturaleza de las «emanaciones»? O bien se trataba de algún tipo de «vapor», o, por el contrario, tenían que ver con partículas que lograban excitar la radiactividad en otras sustancias.

Rutherford observó que la emanación del torio cesaba con relativa rapidez. Este hecho contrastaba con los experimentos realizados con el uranio y el polonio, los cuales se habían mostrado hasta ese momento como fuentes inagotables de rayos alfa y beta. Las emanaciones resultantes de las pruebas realizadas con el torio, por el contrario, eran intensamente radiactivas, pero por corto tiempo: la radiactividad apenas duraba algunos minutos. Dichas emanaciones eran como una presencia fantasmagórica. Las cantidades que se podían recoger de ellas eran mínimas, y su presencia solo era reconocible por la radiactividad, que además desaparecía casi al instante.

En Europa, los Curie también observaron que los elementos próximos al radio en la tabla de los elementos químicos se mostraban radiactivos, lo cual les llevó a plantearse seriamente la posibilidad de que este elemento excitara la radiactividad de materiales cercanos. Años más tarde, Rutherford resumiría de esta manera el grado de conocimiento en aquel momento sobre la cuestión:

> En 1900, el autor [es decir, el propio Rutherford] demostró que el torio, además de expulsar partículas tipo α y β, emite continuamente una «emanación» radiactiva o gas. Tanto el elemento radio como el actinio exhiben una propiedad similar. La intensidad de esta radiación decae

rápidamente. Las «emanaciones» del torio, radio y actinio pueden distinguirse fácilmente entre sí por la rapidez con que pierden su actividad.

¿RADIACTIVIDAD INDUCIDA?

Del mismo modo que la luz hace brillar los minerales fluorescentes, los Curie estaban convencidos de que las «emanaciones» de elementos radiactivos como el torio también eran capaces de provocar la radiactividad de otros elementos. Se trataría de una especie de radiactividad inducida. Rutherford también compartía esa hipótesis, pero sucesivos experimentos lo obligaron a desecharla.

Rutherford pensó que de tratarse de una radiactividad inducida, entonces esta variaría en función de la sustancia que se expusiera a la emanación. Confrontó el torio con todo tipo de materiales, y el resultado fue que siempre se medía la misma actividad radiactiva con independencia del material empleado. Parecía que alguna sustancia contaminaba de radiactividad todo lo que se le acercara.

Lo que tenía mucho más sentido era que las «emanaciones» y la radiactividad inducida fueran fenómenos correlacionados. Así lo aseguró a finales de 1899, cuando escribió que había una «estrecha conexión entre una "emanación" y la radiactividad excitada; de hecho, la "emanación" es de alguna manera la causa directa de la última». Consideraba que no se trataba realmente de radiactividad inducida, sino que la emanación se posaba sobre esos materiales y por ello parecía que se tornaban radiactivos. Tal como aseguró Rutherford, «la emanación es una sustancia inestable y se transforma en un tipo de materia no gaseosa que se deposita en la superficie de todos los cuerpos de su alrededor». En conclusión: «La teoría de que la emanación puede ser debida a que el medio próximo se hace radiactivo queda, por tanto, excluida».

LA FUENTE DE LA RADIACIÓN

La comprensión sobre aquellas cuestiones se tornó aún más confusa a raíz de una nueva observación realizada por Becquerel, según

la cual podría haber habido algún error al identificar las fuentes de radiactividad. Becquerel era consciente de que las sales de uranio no eran puras, sino que en realidad se encontraban varias sustancias distintas, así que trató de separarlas. Al lograrlo, descubrió que la sal de uranio había dejado de ser radiactiva y, en cambio, la nueva sustancia desconocida emitía toda la radiactividad detectada. Como ignoraba de qué sustancia se trataba, pasó a denominarla «uranio X». Pero al cabo de unos meses, al volver a revisar las muestras, observó que el uranio X había perdido su radiactividad, mientras que la sal de uranio original la había recuperado. El químico inglés William Crookes (1832-1919) contrastó el resultado y ambos científicos comunicaron sus observaciones a la Universidad McGill a finales de 1901. En cuanto conoció este hecho, Rutherford quiso comprobar si ocurría lo mismo con sus muestras de torio.

> «No es natural que un solo hombre pueda hacer un descubrimiento repentino; la ciencia va paso a paso y cada hombre depende de la obra de sus predecesores.»
>
> — Ernest Rutherford.

LAS TRANSFORMACIONES RADIACTIVAS

En medio de estas investigaciones, en 1900 Rutherford tuvo que hacer un paréntesis. Por fin iba a celebrarse la boda con Mary Newton, de modo que se desplazó hasta Nueva Zelanda. Fue una ceremonia sencilla, a la que se invitó exclusivamente a la familia. Después de la luna de miel por Estados Unidos y Canadá —viaje que Rutherford aprovechó para recopilar muestras de torio—, Ernest regresó a Montreal en 1901, ya junto a su esposa. En el laboratorio le estaba esperando un nuevo miembro del departamento, con el que iniciaría una prolífica colaboración: Frederick Soddy, un especialista en química, que resultó ser justamente la persona con la preparación que Rutherford necesitaba para poder entender el fenómeno de la emanación y de la radiactividad en general.

FREDERICK SODDY



El químico y profesor universitario inglés Frederick Soddy (1877-1956) fue uno de los colaboradores más brillantes de Rutherford. A pesar de que solo trabajaron juntos desde 1901 hasta inicios de 1903, fue un período muy intenso en el que firmaron uno de los capítulos más importantes de la ciencia. Años más tarde, Soddy comentó de la siguiente manera su breve y fructífero paso junto al genio neozelandés:

> Cuando ya nuestra colaboración hubo finalizado, la radiactividad, que se había convertido en un rompecabezas considerable, se había logrado juntar y solucionar, y mi impresión general que ha permanecido de aquellos días es la de una exaltación mental intensa cuando las piezas se juntaron y se ajustaron en un todo convincente a una única teoría de la desintegración atómica.

Ambos científicos tenían que dar respuesta a varios interrogantes: averiguar si la radiactividad del torio también procedía de otro elemento, cuál era la naturaleza de la emanación y cómo se relacionaba con la actividad que parecía provocar en otros elementos. La radiactividad se había tornado en un puzle en el que había que identificar todas las piezas, sin que pareciera posible por el momento atinar a encajarlas unas con otras.

LA NATURALEZA DE LA EMANACIÓN

En primer lugar, Rutherford y Soddy se volcaron en descubrir la naturaleza de la emanación. Soddy era un gran químico, y rápidamente fue capaz de reconocer que la emanación era en realidad un

Soddy estudió química en Oxford. Posteriormente se dirigió a Montreal en 1900, donde al año siguiente empezó a trabajar con Rutherford. A principios de 1903, Frederick Soddy partió hacia Londres para trabajar junto a William Ramsay, experto en gases nobles, con el que también estuvo un tiempo breve, para a continuación ser profesor en la Universidad de Glasgow, hasta que obtuvo una cátedra como profesor de química en Oxford, la universidad donde se había formado y en la que estuvo de 1919 a 1937. Además de sus estudios sobre las desintegraciones radiactivas, Soddy estuvo muy interesado en los isótopos, término que hace referencia a los elementos de distinto número másico que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica. Fue el propio Soddy quien introdujo este término en el vocabulario científico (a partir de una sugerencia de la novelista y doctora Margaret Todd). En 1917 descubrió el elemento protactinio y en 1920 escribió el libro *Ciencia y vida*. En 1921 logró el premio Nobel de Química por sus estudios sobre la química de las sustancias radiactivas y sobre el origen y naturaleza de los isótopos. Al final de su vida, estuvo muy preocupado por cuestiones sociales y la paz mundial, principalmente por el uso que se podía dar a la energía nuclear. Después de la Segunda Guerra Mundial escribió:

> El lanzamiento de la bomba atómica es un problema muy profundo [...]. En lugar de la conmemoración de Hiroshima habría que celebrar [...] el triunfo del ser humano sobre el problema [de la transmutación], y no el mal uso que por primera vez han dado los políticos y las autoridades militares.

gas similar al argón, esto es, inerte, dado que no reaccionaba con ninguna sustancia. Este gas pasó a denominarse *radón*.

Los gases nobles se habían empezado a comprender a partir de 1894, así que constituían un campo de estudio muy reciente. En la tabla periódica aún no se sabía bien dónde colocar este tipo de elementos y por esta razón se abrió una nueva columna para irlos incorporando allí. En todo caso, desde 1902 empezó a tomar cuerpo la hipótesis de que el torio se podría estar transformando en gas, como si este elemento sólido se fuera evaporando. La emanación o gas radón, por otro lado, parecía estar cargado positivamente porque al aproximarse a un metal cargado negativamente, este se tornaba muy radiactivo.

Sobre la emanación, seguía existiendo el problema de su relación con el fenómeno de la radiactividad. ¿Cómo encajaba y que

EL RADÓN Y LA TABLA PERIÓDICA

El físico inglés John William Strutt, lord Rayleigh (1842-1919), antecesor en el cargo que ocupaba J.J. Thomson en el laboratorio Cavendish —junto al químico escocés William Ramsay (1852-1916)—, había descubierto el argón en 1894. Lord Rayleigh halló que el peso del nitrógeno del aire era menor que el peso del nitrógeno obtenido a partir de reacciones químicas. Más tarde, Ramsay explicó esta anomalía señalando que se debía a la presencia de impurezas en el aire. Finalmente se logró separar el gas que alteraba los resultados del peso del nitrógeno y se le llamó «argón». El término griego *argon* alude al hecho de ser un gas inerte que no reacciona con ningún otro elemento. Otro gas noble, el helio, fue descubierto por Pierre Janssen y Joseph Norman Lockyer en 1868, cuando analizaron la composición química del Sol empleando la espectrografía de luz solar. Ramsay fue un químico que se especializó en el estudio de estos gases no reactivos. Observó, por ejemplo, que el helio no solo se encontraba en la atmósfera, sino que también se hallaba en el mineral del uranio (fenómeno que fue capaz de explicar Rutherford más tarde cuando descubrió la naturaleza de los rayos alfa).

La tabla de Mendeléyev

Todos estos descubrimientos sobre los gases nobles obligaron a Dmitri Ivánovich Mendeléyev (1834-1907) a modificar en 1902 su tabla periódica de los elementos químicos para añadir una nueva columna donde tuvieran su propio espacio. La ordenación de los elementos químicos según la tabla periódica había sido un gran hallazgo. Para identificar un elemento, los químicos usaban principalmente el peso atómico. Gracias a este aspecto, los elementos se podían ordenar de tal modo que, casi sin excepciones, el peso de los elementos era, con relación al hidrógeno, un valor entero. Numerosos químicos, como

vínculo existía con la emisión de las partículas alfa y beta? Esa era una cuestión clave.

DESINTEGRACIÓN Y RECUPERACIÓN RADIACTIVA

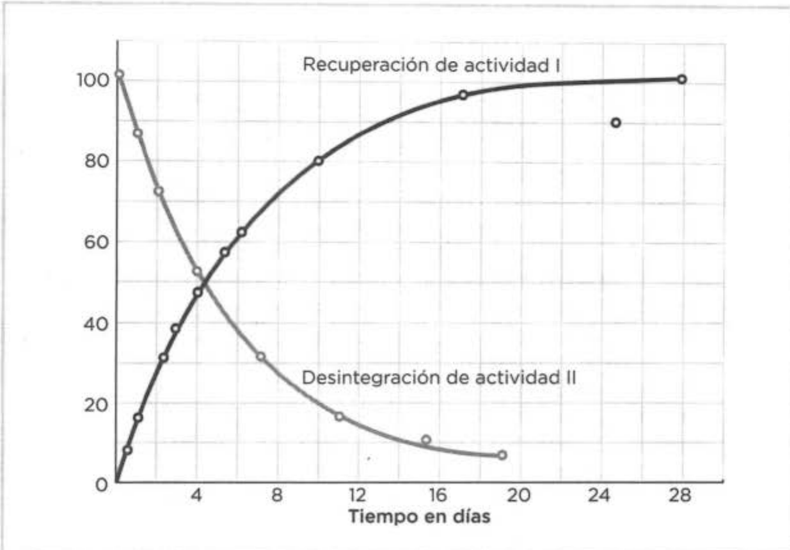
Rutherford y Soddy también se pusieron manos a la obra para comprobar el fenómeno descubierto por Crookes y Becquerel sobre el uranio y el uranio X. En su caso, hicieron los experimen-

Lavoisier, ya se habían dado cuenta de que existían ciertas similitudes entre algunos elementos, pero quien realmente llegó a hacer una propuesta sistemática de ordenación fue Mendeléyev. Este aprovechó las pautas que observaba en ciertas características de los elementos —como ser más o menos reactivos, o bien su valencia— para reordenarlos utilizando una clasificación que se desplegaba en las dos dimensiones de la tabla. El peso atómico seguía siendo un factor igualmente importante (ordenación en el eje vertical), pero se ordenaron los elementos de izquierda a derecha formando períodos y grupos. Los grupos, que son los elementos de la misma columna, compartían numerosas características, a pesar de llegar a ser elementos con muy distinto peso atómico. Con tan solo ese simple cambio en la forma de clasificar las sustancias, fue posible establecer numerosas relaciones de semejanzas, especialmente en sus características químicas. Mendeléyev tuvo el acierto de dejar espacios huecos para situar elementos hasta entonces desconocidos, allí donde sospechaba que tenía que haber algún elemento todavía por descubrir. El químico ruso fue incluso capaz de predecir las características de estas sustancias todavía desconocidas, que finalmente terminaron por hallarse, como fue el caso del germanio o del galio.



El químico ruso Dmitri Ivánovich Mendeléyev hacia 1880-1890.

tos usando el torio, el elemento habitual que utilizaba en las diferentes prácticas de laboratorio. Para su sorpresa, también fueron capaces de separar una sustancia del torio que emitía gran parte de la radiación. De nuevo ignoraban de qué sustancia se trataba, aunque estaba claro que era químicamente distinta al torio, de modo que lo llamaron «torio X». Al extraer el torio X del torio, este último perdía radiactividad a un ritmo exponencial; la misma radiactividad que ganaba el torio X. Al final se dieron cuenta de que el torio era capaz de producir torio X y reemplazar así las



muestras que habían perdido actividad. También lograron establecer que del torio X surgía una emanación. Por tanto, habían hallado una cadena de acontecimientos: el torio produce torio X, y el torio X emite emanación.

Soddy y Rutherford fueron más allá de lo que habían estudiado los equipos europeos al mostrar en gráficas el comportamiento del torio y su actividad, que crecía de forma exponencial, y del torio X y su línea de actividad descendente (véase la figura).

Esta gráfica de desintegración y recuperación de la radiactividad mostraba, por un lado, relaciones de carácter exponencial entre la actividad y el tiempo para ambos indicadores, cuya suma de valores era un valor constante (complementariedad). Todo apuntaba a pensar que estos dos fenómenos no ocurrían por azar, sino que había una relación entre el torio y el torio X: el torio estaba produciendo una sustancia distinta a sí mismo, es decir, los átomos de torio X se producían por descomposición de los del torio. Una relación de parentesco y familiar, como un padre con sus hijas (esta fue de hecho la expresión que usó Rutherford). Ernest Rutherford resumió estos descubrimientos del siguiente modo:

La mayor parte de la radiactividad del torio se debe a un tipo de materia, torio X, que posee propiedades químicas diferentes y que es temporalmente radiactivo, decayendo su actividad a la mitad en unos cuatro días.

Más tarde se descubrió que el torio X era en realidad lo que se llama un *isótopo*, especialmente radiactivo, de radio. Las piezas empezaban extrañamente a encajar. ¿Y qué papel desempeñaba exactamente la radiactividad en todo este proceso? ¿Qué tenía que ver con los rayos alfa y beta? ¿Era como un producto secundario de otras transmutaciones? ¿O bien intervenía de forma central y decisiva?

> «Lo que el pecado es para el moralista, o el crimen para el jurista, eso es la ignorancia para el hombre de ciencia.»
>
> — Frederick Soddy.

La hipótesis que empezaban a confeccionar Rutherford y Soddy era que tras una emisión alfa, el torio se transformaba en torio X, y tras otra emisión alfa, este producía la emanación. Esta secuencia de fenómenos se podía aplicar también al uranio y al polonio. La clave del problema que permitiría alcanzar la solución residía en las partículas alfa. Cuando Rutherford supo lo que eran las partículas alfa, todas las piezas hallaron por fin su lugar y mostraron el hermoso paisaje de una nueva rama de la física que había surgido prácticamente de la nada.

LA RADIACIÓN ALFA, DE NUEVO

Existía una completa oscuridad sobre cómo eran los átomos —Rutherford aún tardaría años en hallar el núcleo— y durante esa época apenas se tenía conocimiento de los electrones. Aunque se sospechaba que la energía de la radiactividad procedía de algún modo del corazón de los átomos, se ignoraba por completo el mecanismo por el que se producía.

Rutherford apostó en primer lugar por pensar que la radiactividad surgía debido a que una cierta perturbación cambiaba la disposición interna de los átomos, creando un estado de inestabilidad. En ese momento se producirían las emisiones de rayos X y de radiación beta, lo que daría lugar a una reconfiguración del material, todavía inestable, y ello ocasionaría nuevas emisiones de radiación tipo alfa. Según su primera hipótesis, la radiactividad era un producto indirecto de un fenómeno de inestabilidad interna de la configuración atómica, en cierto modo un mecanismo de tipo secundario. Ya se sabía que los rayos beta se identificaban con los electrones, de modo que se pensaba que al ser tan poco masivos no podían perturbar la naturaleza de los átomos. Sin embargo, era necesario poder explicar qué eran los rayos alfa.

Se sospechaba que tenían carga positiva. Sin embargo, cuando se había tratado de detectar radiactividad empleando campos magnéticos, los rayos no modificaban su trayectoria, de modo que parecía que esta hipótesis tenía que descartarse. Rutherford no se conformó con estos resultados y decidió volver a intentar este experimento pero recurriendo, esta vez, a una fuente de rayos alfa de mayor intensidad y a un generador de campos magnéticos más potente. Los Curie le suministraron radio, y de un departamento de la Universidad McGill pudo tomar prestado un aparato para generar el campo magnético (un imán). En otoño de 1902, Rutherford observó que los rayos alfa sí variaban su trayectoria al pasar por el campo magnético, y lo hacían en dirección opuesta a los rayos beta, que ya se sabía que tenían carga eléctrica negativa. Esto se podía interpretar como que su carga eléctrica era positiva. Si ese hecho no había podido ser revelado hasta aquel momento fue debido a que las partículas alfa eran mucho más masivas que las partículas beta.

Si unos rayos compuestos por elementos de masa no despreciable emergían del interior de los átomos, era absurdo no deducir que estos tenían que representar cambios importantes en la propia estructura interna de la materia. Esta emisión de rayos alfa se pensó que debía de ser de hecho la que podía provocar el resto de cambios y emisiones de radiación observados. Mientras que la emisión de radiación electromagnética o la eyección

de electrones —los rayos beta— no implicaba que se produjera trasmutación del elemento químico (radiactivo), el hecho de que se emitieran también rayos con tanta masa exigía revisar esta consideración. Por lo tanto, este descubrimiento fue clave para que Rutherford y Soddy acabaran proponiendo su teoría de las desintegraciones radiactivas.

La radiactividad no podía tratarse de un fenómeno secundario, colateral, sino que había que entenderlo como un aspecto central, considerando que del seno del material radiactivo se desprendían partículas con masa similar a la de otros elementos químicos. En 1903, momento en que Soddy abandonó la Universidad McGill en Montreal para trabajar junto a William Ramsay en Londres, ya habían terminado de enunciar la teoría de la desintegración radiactiva, la cual constituía un modelo en el que encajaban todas las piezas del rompecabezas radiactivo.

LA DESINTEGRACIÓN DEL ÁTOMO

Fue, pues, entre 1902 y 1903 cuando Soddy y Rutherford desarrollaron la teoría de las desintegraciones radiactivas, capaz de responder al misterio de las emanaciones, de la excitación, de la desintegración y recuperación radiactiva, y de la transferencia radiactiva, torio X. Según enunciaron, la radiactividad se producía porque determinado elemento, como el torio o el uranio, se transformaba en otro elemento, lo que incluía que en ese proceso reemitiera partículas alfa y beta. Con la transformación o desintegración del átomo original —el elemento padre—, aparecía un nuevo átomo, que es el que se había bautizado como torio X o bien uranio X, y que en realidad eran otros elementos químicos a su vez radiactivos, como podían ser el radio o el polonio. Estos se caracterizaban por ser más inestables y emitir mayor radiación, de modo que, paradójicamente, se desintegraban mucho más rápido, formando otros elementos también radiactivos. Rutherford y Soddy describieron con estas palabras su concepción del fenómeno de la radiactividad:

Se demuestra que la radiactividad está acompañada por cambios químicos en los que se están produciendo continuamente nuevos tipos de materia. Los productos de estas reacciones son al principio radiactivos, pero su actividad disminuye de manera regular desde el momento de su formación.

LA ALQUIMIA

En el curso de las investigaciones, llegó un momento en el que Soddy exclamó: «Rutherford, esto es transmutación: el torio se desintegra y transmuta a sí mismo en un gas del grupo del argón». A lo que Rutherford repuso: «Soddy, no lo llames transmutación. Nuestras cabezas van a rodar por alquimistas». En esa época se habían extendido entre la población numerosas ideas seudocientíficas sobre la transmutación de los elementos. Proliferaban las asociaciones sobre alquimia, con sus revistas y congresos. No contaban con ningún tipo de respaldo ni crédito por parte del mundo científico, por lo que descubrir que uno de los más prometedores científicos del mundo se alineara con estos grupos supuso una conmoción. Mientras Rutherford estaba trabajando en la teoría de la desintegración radiactiva, hubo colegas que le expresaron su miedo a que sus concepciones sobre la transmutación espontánea de la materia «pudiesen desacreditar a la Universidad McGill». En una reunión se le llegó a advertir de que retrasase la publicación de sus descubrimientos hasta que no estuvieran verificados por completo. Rutherford, que destacó precisamente por cometer escasos errores en sus experimentos y procedimientos, recibió la advertencia con tristeza y también con furia por ser consciente de que tales críticas no estaban en absoluto fundamentadas.



Imagen de un laboratorio alquímico, extraída de *La historia de la alquimia y los comienzos de la química*, del químico y escritor escocés M.M. Pattison Muir (1848-1931).

El descubrimiento de la naturaleza de los rayos alfa les permitió afirmar lo siguiente:

> La desintegración del átomo y la expulsión de partículas cargadas pesadas, con masas del mismo orden que el átomo de hidrógeno, deja un nuevo sistema más ligero que antes, y poseyendo propiedades químicas y físicas bastante diferentes del elemento original. El proceso de desintegración, una vez empezado, procede de nivel a nivel a ritmos que se pueden medir para cada caso.

Las radiaciones alfa y beta, que Rutherford había logrado distinguir en años precedentes, se entendieron ahora como una consecuencia de esa desintegración en el interior de la materia, de esa inestabilidad esencial de los átomos de elementos radiactivos. Ya no eran vistas como radiaciones, sino como partículas que escapaban de los átomos, de tal modo que eso alteraba su estructura, su naturaleza. Los átomos se transmutaban espontáneamente de un elemento en otro.

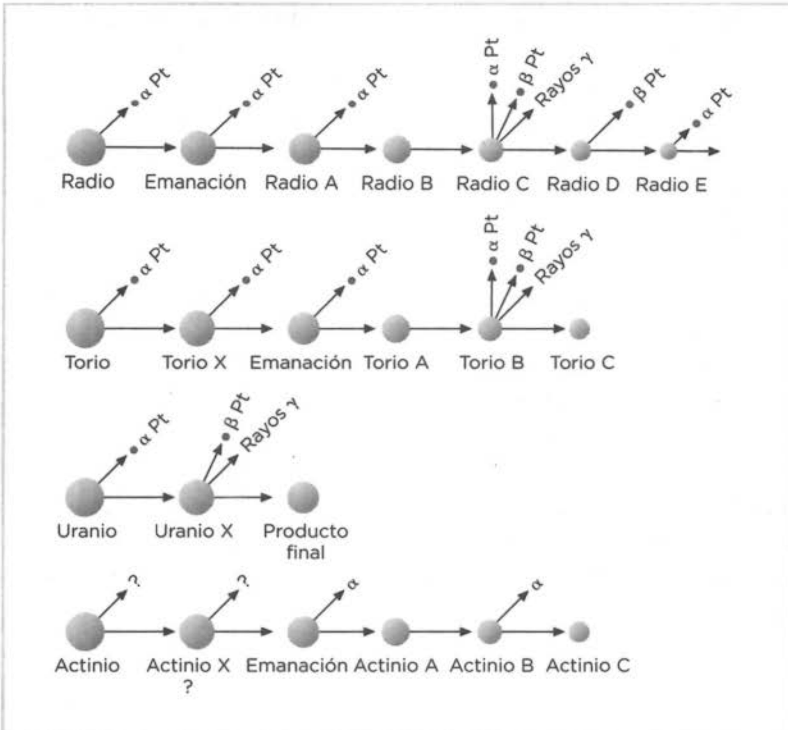
> «La historia de la humanidad refleja y está dominada por la cantidad de energía disponible.»
>
> — Frederick Soddy.

Rutherford y Soddy introdujeron un vocabulario especial para referirse a estos elementos. Llamaron «padres» a los elementos radiactivos, e «hijos» a los átomos en los que se transformaban después de la desintegración.

LAS FAMILIAS RADIACTIVAS

Con los descubrimientos realizados hasta ese momento ya era factible tener una cierta visión general sobre la radiactividad. Por un lado, había una serie de materiales radiactivos que existen desde la formación de la Tierra. Elementos como el torio o el uranio en realidad no son muy activos radiactivamente, es

En 1904, Rutherford sintetizó mediante estos diagramas todo el conocimiento adquirido en la época sobre las secuencias radiactivas para distintos elementos. Se observan cadenas de emisiones de rayos y la transformación del elemento original en otros elementos. «α Pt» se refiere a partículas alfa y «β Pt» son los rayos beta. En la actualidad, las familias radiactivas naturales se reducen a 3: la del torio, la del uranio y la del actinio.



decir, no son muy inestables comparados con otros elementos radiactivos, y por esa razón su tiempo de desintegración es más largo. Sin embargo, cuando se desintegran, lo cual se produce de forma natural —es un fenómeno aleatorio que solo puede cuantificarse mediante métodos basados en la estadística—, producen otras sustancias que son mucho más activas. Al emitir partículas alfa, es decir, núcleos de helio, el átomo original en realidad ya no existiría como el mismo elemento, y en su lugar se formaría una sustancia menos estable y que acostumbra a tener una mayor radiactividad. Tal como pudo desvelarse años más tarde, la radiación beta también deriva de transformaciones fundamentales en el átomo —y más en concreto en su núcleo, aunque en ese momento Rutherford aún no había desvelado la estructura interna del átomo—, dado que los electrones y radia-

ción aparecen cuando un neutrón se desintegra dando lugar a un protón y un electrón.

La inestabilidad del segundo producto de la desintegración implica que esta se convierte a su vez en un tercer producto, que también es inestable. ¿Tenía todo esto algún fin? Cada vez resultaba más evidente que habiendo gran cantidad de sustancias radiactivas debían de algún modo estar emparentadas, formando familias.

En la actualidad se conocen tres familias radiactivas naturales: la del torio, la del uranio y la del actinio (véase la figura de página anterior), en las que el proceso de desintegración finaliza cuando se obtiene un elemento no radiactivo y estable como el plomo. Según la imagen del propio Rutherford, a la cabeza de la familia se halla un padre, con un peso atómico muy elevado. El padre tiene descendientes —los hijos— y la saga se termina en un elemento de naturaleza estable. Cuando observó por vez primera la radiactividad, Becquerel estaba usando uno de los isótopos del uranio que al emitir radiación alfa se convierten en torio. Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico pero que difieren en el número de neutrones que constituyen el núcleo; tienen por tanto distinta masa atómica, pero el número de protones y electrones es el mismo. El mecanismo por fin había quedado desvelado gracias a Ernest Rutherford y a su ayudante Frederick Soddy (véanse más detalles en el anexo la desintegración alfa y beta).

PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN O SEMIVIDA

Desde sus primeras investigaciones con la radiactividad, Rutherford se había dado cuenta de que el ritmo de las emisiones radiactivas disminuía con el tiempo. En algunos elementos, la radiactividad podía agotarse al cabo de pocos segundos, mientras que en otros casos podía prolongarse durante días o meses. Y si bien en un principio parecía que solo los elementos más activos tenían esa propiedad, al establecer su teoría de la desintegración

LA EXPRESIÓN MATEMÁTICA DEL PERÍODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN O SEMIVIDA

Aunque Rutherford era sobre todo un físico experimental, también trató de plasmar matemáticamente el concepto de «desintegración» (y de ahí la noción de «semivida») con fórmulas, de modo que se pudiera expresar el número de átomos de material radiactivo en función del tiempo. Tal como se ha explicado, el número de desintegraciones atómicas decae de forma exponencial, de manera que la fórmula matemática que permite cuantificarlo sería la siguiente. Partiendo de que N_0 es el número de átomos de material radiactivo en el momento inicial, N es el número de átomos radiactivos en un momento dado:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

donde λ es la constante de desintegración radiactiva para el elemento en cuestión y e es una constante matemática, el número de Euler (número irracional cuyo valor (truncado) es 2,718...). Para establecer el ritmo con el que se desintegran los átomos radiactivos, se deriva la expresión anterior respecto al tiempo:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = -\lambda N.$$

De este modo es fácil entender que la tasa de desintegración está relacionada con el número de átomos que quedan en cada momento. A medida que los átomos se desintegran, la tasa de desintegración también se reduce. El período de semidesintegración o semivida (T), definido como el período de tiempo en que el número de átomos radiactivos se reduce a la mitad, también se puede deducir de la expresión anterior. T es el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad del número inicial de átomos radiactivos, esto es, $N = N_0/2$:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 \cdot e^{(-T)},$$

Simplificando N_0, $e^{\lambda T} = 2$, o, lo que es lo mismo: $\lambda T = ln2 = 0,693$. Por tanto, el período de semidesintegración es igual a:

$$T = \frac{0,693}{\lambda}.$$

radiactiva observó que siempre que había radiactividad, la cantidad de átomos originales tenían que ir menguando paulatinamente, hasta que no quedara ni rastro.

Rutherford también se dio cuenta de que la duración de la existencia de un elemento radiactivo era como una huella dactilar que permitía identificar de qué elemento se trataba. Un elemento con una desintegración lenta como el uranio podía durar miles de años, mientras que otros elementos existían durante escasos segundos (en la actualidad se sintetizan elementos cuya radiactividad se manifiesta en fracciones de segundo). El científico neozelandés había aprendido que la radiactividad natural es un fenómeno que se produce de forma probabilística, y, por tanto, es imposible predecir cuándo se va a producir la siguiente desintegración de forma exacta. Sin embargo, desde un punto de vista estadístico, las desintegraciones se producen siguiendo una regularidad. De este modo, aunque es imposible determinar cuándo va a ocurrir concretamente una desintegración, considerando las desintegraciones tomadas como un conjunto sí que puede establecerse una sistemática. Dicho de otro modo, para un elemento radiactivo, la probabilidad de que en un núcleo de ese elemento se produzca una desintegración por unidad de tiempo es constante. Este valor constante se conoce como «constante de desintegración radiactiva» y se representa con la letra lambda (λ).

> «La verdadera ciencia enseña, sobre todo, a dudar y a ser ignorante.»
>
> — Ernest Rutherford.

Rutherford consideró conveniente introducir el concepto de «período de desintegración» o «semivida» de un elemento radiactivo, definido como el tiempo necesario para que el número de átomos radiactivos que hay en una muestra se reduzca a la mitad. Este concepto permitía ilustrar la rapidez con la que una sustancia radiactiva se desintegra para dar lugar a otro elemento de la familia. Por ejemplo, el período de semidesintegración de uno de los isótopos del uranio es de 4 500 millones de años (valor que se cree coincidente con la edad de la Tierra). Existen diferentes variedades del uranio, cada uno con un período de semidesintegración distinto.

Estas investigaciones tuvieron una extraordinaria repercusión en otra disciplina científica que se desarrollaba esencialmente al margen de la física atómica: se trataba de la geología. Rutherford se encontraba un día paseando por el campus de McGill, y se tropezó con un profesor de geología, al que preguntó: «¿Cuántos años se supone que tiene la Tierra?». «Cien millones de años», le respondió el profesor. Entonces Rutherford tomó un pedazo de pechblenda y le repuso: «Sé, y lo sé como un hecho objetivo, que este trozo de pechblenda tiene setecientos millones de años». Nos podemos imaginar la cara de perplejidad del geólogo. Pero ¿cómo osó Rutherford afirmar tal cosa?

Desde el siglo XVIII se tenía la convicción de que el sistema solar había tenido un origen en el tiempo —se hipotetizaba sobre una nube de polvo a partir de la cual se originarían el Sol y los planetas—. Se habían propuesto ingeniosos y variados métodos de datación. Por ejemplo, se calculó que se requerían unos cien millones de años para explicar la concentración de sal en los mares y océanos de la Tierra, basándose en los procesos de erosión. La cifra barajada por el geólogo cuando fue interrogado por Rutherford debió de basarse en ese método.

El físico y matemático británico William Thomson, lord Kelvin (1824-1907), fue uno de los principales científicos que se esforzaron en dar respuesta a esta pregunta. En 1862 publicó un artículo titulado «Sobre la edad de calor del Sol», en el que, basándose en cálculos energéticos, llegaba a la conclusión de que su edad se encontraba entre los 24 y los 400 millones de años. Suponiendo que el origen de la Tierra era roca fundida, se podía calcular el calor emitido hasta alcanzar la situación actual. Lord Kelvin acotaba, aunque erróneamente, la existencia de la Tierra. También hizo la proyección de sus cálculos respecto al futuro, y sus conclusiones no eran optimistas, dado que, según sus consideraciones, el Sol tampoco podría seguir emitiendo tanta energía por mucho tiempo:

> Respecto al futuro, debemos decir con la misma certeza que los habitantes de la Tierra no podrán continuar disfrutando de la luz y

el calor esenciales para su vida por muchos millones de años, a no ser que fuentes de calor desconocidas ahora por nosotros estén preparadas en el gran almacén de la creación.

Una controversia colateral del problema de la edad de la Tierra se establecía en relación a la teoría de la selección natural. Darwin había llegado a la conclusión de que era necesario un período de tiempo más largo que el aceptado por la física para que se pudiera desplegar toda la variabilidad de vida surgida a partir de la selección natural. El propio Darwin expresó su preocupación con algunos de sus corresponsales:

> Estoy enormemente preocupado por la corta duración del mundo, de acuerdo con sir W. Thomson, porque para apoyar mis teorías, necesito un período muy largo antes de la formación del Cámbrico.

Ante esa incongruencia, la física se presentaba como una disciplina mucho más sólida y venerable que la teoría biológica de la selección darwiniana, por lo que en el conflicto esta última salía perdiendo, y ese pudo ser un factor de peso para explicar por qué a principios del siglo XX la teoría de la selección natural contaba con pocos partidarios. Sin embargo, las consideraciones y los cálculos consecuentes de lord Kelvin estaban fuertemente equivocados, tal como probaría Rutherford.

Como ya se ha explicado, un elemento es radiactivo porque su estructura es de algún modo inestable, y debido al proceso de desintegración radiactiva adquiere mayor estabilidad. Por ejemplo, el uranio, con 92 protones, sufre una desintegración alfa por la que pierde dos protones, de modo que acaba transformado en torio (que es el elemento que ocupa la posición 90 en la tabla periódica). El torio, a su vez, en una desintegración alfa, pierde otros dos protones, por lo que se convierte en el elemento que tiene como número atómico el 88, que resulta ser la posición en la tabla de los elementos químicos del radio. Este conjunto de procesos de desintegraciones forma una secuencia de elementos químicos que constituyen una familia radiactiva natural, la cual termina en el plomo, que es un elemento estable.

LA EDAD DE LA TIERRA



Arthur Holmes en 1912.

En la actualidad se cree que la Tierra tiene 4550 millones de años gracias a la intuición que tuvo Rutherford de usar la radiactividad para hacer esta estimación (existe un afloramiento de piedra al norte de Canadá llamada gneis Acasa que se ha calculado que tiene unos cuatro mil millones de años y que es la más antigua conocida). Sin embargo, este tema no captó el interés del científico, y lo máximo que llegó a publicar fueron artículos de divulgación (como el de la revista *Harper*, titulado «Radio, la causa del calor de la Tierra»). Otros científicos, como el estadounidense Bertram Boltwood (1870-1927), dedicaron más tiempo a indagar sobre esta cuestión. Entre Boltwood y Rutherford llegaron a la conclusión de que el mejor método de datación era comparar las cantidades de uranio y plomo. Tras muchos cálculos, se avanzó que la edad de la Tierra tenía que hallarse entre 250 y 1300 millones de años. El geólogo británico Arthur Holmes (1890-1965) prosiguió los trabajos de Boltwood y Rutherford, y tuvo en cuenta los diferentes tipos de isótopos de los elementos radiactivos, cada uno con su distinta vida media, para realizar los experimentos. Los geólogos, que en un principio habían ignorado este tipo de estudios, empezaron a asumir los resultados y Holmes publicó en 1927 *La edad de la Tierra*, libro en el que aseguraba que la Tierra tenía una edad comprendida entre 1300 y 3000 millones de años. Sin embargo, las muestras terrestres no son las más adecuadas para tratar de hallar un valor para el origen de la Tierra, dado que fenómenos como la tectónica de placas y la erosión introducen cierto margen de error a los datos basados en la radiactividad. El actual consenso en referencia a la edad de nuestro planeta nace de un estudio realizado por el geoquímico Clair Cameron Patterson, quien en 1953 efectuó las primeras medidas precisas de la Tierra estudiando datos basados en muestras del impacto de meteoritos. En la actualidad, la cifra se concreta en 4550 millones de años.

Dado que Rutherford podía determinar el ritmo de desintegración de cada uno de ellos, tuvo la adecuada idea de considerar que a partir de esta información era posible establecer la edad de

la Tierra. Solo era necesario saber las cantidades de plomo —que es el producto estable que resulta en la cadena de desintegración del uranio— en relación con la cantidad de uranio existente en una mina (en un principio pensó en el helio, pero, al ser un gas, los resultados obtenidos no serían fiables porque una parte se habría escapado a la atmósfera).

A pesar de su genial propuesta, Rutherford dejó que fueran otros científicos los que concretaran los mecanismos por los que se ha llegado a establecer la edad actual de la Tierra. Sin embargo, sí sintió la necesidad de escribir algún artículo de divulgación sobre este tema, y también impartió una charla en el Reino Unido, en la que expuso tales ideas. Allí tuvo a un oyente de excepción, el propio lord Kelvin. Rutherford explicó el encuentro como sigue:

> Para mi alivio, Kelvin se quedó dormido, pero cuando llegué al punto importante vi incorporarse al viejo zorro, abrir un ojo y echarme una mirada siniestra. Entonces tuve una súbita inspiración y dije: «Lord Kelvin había puesto un límite a la edad de la Tierra, siempre que no se descubriera ninguna nueva fuente de calor. Esa profética observación alude a lo que estamos considerando esta noche, la radiactividad». El viejo me sonrió.

La radiactividad se interpretaría como una nueva fuente de calor que podría estar calentando la Tierra desde su propio interior —los cálculos de Kelvin, por tanto, aunque correctos, partían de hipótesis imprecisas— y también podría estar alimentando al propio Sol, de modo que la edad de la Tierra podría ser mucho mayor de lo que creía el viejo científico, así como perdurar un tiempo inimaginable según las leyes físicas conocidas en el siglo XIX.

Según los cálculos de Kelvin, al Sol le restaban cinco o seis millones de años de vida antes de agotarse, pero según Rutherford le quedarían aún centenares de millones de años. Al anciano lord Kelvin, sin embargo, jamás le convenció la nueva ciencia de la radiactividad, a pesar de que según sus propias palabras la había estudiado con gran atención.

LA ENERGÍA

Otro aspecto que no había pasado desapercibido a ninguno de los protagonistas del hallazgo de la radiactividad, como los Curie o Rutherford y Soddy, eran las ingentes cantidades de energía que estaban emanando del seno de la materia, como si los átomos fueran una fuente inagotable de energía en la que la radiactividad constituiría apenas una insignificante fuga. Exponiendo agua helada al radio se podía lograr que en menos de una hora el agua se evaporara. Por no citar las múltiples quemaduras que su contacto producía a Marie y Pierre Curie y que les obligaba a trabajar con las manos vendadas. Rutherford y Soddy estimaron la energía desprendida por un gramo de radio después de todas sus transformaciones en diez mil millones de calorías. Era energía que estaba contenida en la materia, y si alguien lograra desatarla de forma incontrolada podría acabar con todo el mundo conocido.

En 1903, Rutherford y Soddy ya adelantaron que con la radiactividad se manejaban energías que no correspondían a las reacciones:

> La radiactividad tiene que entenderse como el resultado de un proceso que yace totalmente fuera de la esfera de las fuerzas controlables conocidas... Todas estas consideraciones apuntan a la conclusión de que la energía latente en el átomo tiene que ser enorme en comparación con la que se produce libremente en los cambios químicos ordinarios.

También entrevieron que esa energía concentrada en los átomos radiactivos podría ser en realidad una propiedad intrínseca de todos los tipos de átomos habidos en el del universo:

> No hay ninguna razón para creer que esta gran cantidad de energía almacenada la posean exclusivamente los radioelementos.

La primera persona en concebir un vínculo entre masa y energía fue precisamente Soddy, al pensar que podía haber una relación entre la pérdida de masa que sufría el radio en sus trans-

formaciones con la cantidad de energía desatada. Sobre esta cuestión, Soddy aseguró:

> Es probable que toda la materia pesada posea —latente y enlazada con la estructura del átomo— una cantidad similar de energía a la que posee el radio. Si pudiera ser extraída y controlada, ¡menudo agente sería en transformar el destino del mundo! El hombre que pusiera las manos en la palanca con la que una naturaleza parsimoniosa regula tan celosamente la extracción de este almacén de energía poseería un arma con la que podría destruir la Tierra si quisiera.

Con posterioridad, en 1905, Albert Einstein introdujo su famosa fórmula, $E = mc^2$, en la que precisamente explicaba que la masa tenía su correspondencia directa con la energía. Sin embargo, la fórmula de Einstein no es capaz de indicar cómo extraer la energía de la materia; se limita a constatar su relación. El resultado, por otro lado, fue ignorado en el momento en el que publicó la ecuación y su influencia en los acontecimientos siguientes fue más bien circunstancial. Los científicos de aquella época se encontraban con la radiactividad ante una fuerte de energía impensada, de modo que parecía necesario esperar a ver si la humanidad podría aprovecharse para bien o para mal de esa riqueza. Respecto a cómo aprovechar esta energía almacenada, hubo opiniones dispares.

Hacia el final de su vida, en 1933, Rutherford se mostró muy cauto y escéptico respecto al posible aprovechamiento energético de la energía:

> No podemos controlar la energía atómica hasta el punto de que pueda tener un valor comercial, y creo que jamás vamos a ser capaces de lograrlo. Se han dicho muchas tonterías sobre la transmutación. Nuestro interés en la materia es puramente científico, y los experimentos que se están llevando a cabo ayudarán a una mejor comprensión de la estructura de la materia.

Sin embargo, anteriormente, algunas bromas que le gustaba gastar a Rutherford sobre la energía contenida en los átomos tuvieron un gran eco. Por ejemplo, existe una en la que se hacía una

referencia implícita a la palanca de Arquímedes con la cual podría mover el mundo, ahora convertida en detonador:

> Si se pudiera encontrar un detonador adecuado, sería justamente concebible que una onda de desintegración atómica pudiera iniciarse dentro de la materia y que de hecho pudiera lograr que este viejo mundo se desvaneciera en humo.

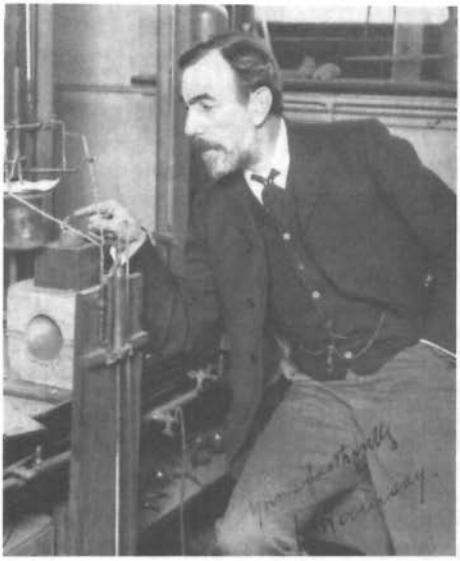
Medio en broma, medio en serio, también hablaba de la posibilidad de que «algún estúpido en el laboratorio podría ser capaz de reventar el universo de forma inadvertida». Soddy, por el contrario, era más optimista y pensaba que la energía nuclear podía ser la promesa de un mundo mucho mejor, gracias a la cual la Tierra se podría convertir en un «sonriente Jardín del Edén».

DE MCGILL AL NOBEL

Mientras Rutherford todavía estaba en McGill fue asumiendo que sus descubrimientos podían acabar reportándole el premio Nobel. También pensaba, sin embargo, que este reconocimiento solo tendría lugar una vez transcurridos bastantes años y solo después de de que lo hubiera recibido su maestro J.J. Thomson. Lo que no podía prever era que no iba a recibirlo en Física, sino en Química, una disciplina por la que no tenía especial simpatía.

El premio Nobel de Física se había instaurado en 1901 y fue a parar en primer lugar a manos de Röntgen por su descubrimiento de los rayos X. Ya en 1903, lo recibieron Pierre y Marie Curie, junto a Becquerel. La radiactividad estaba entre los descubrimientos más importantes de la época, por lo que era lógico pensar que Rutherford también sería recompensando por el inmenso trabajo que estaba realizando.

Sin embargo, a pesar de la excelente labor desarrollada y de contar con todos los medios en McGill, Rutherford mostró desde su llegada a Montreal un gran interés por retornar a Europa. Se sentía desplazado del centro de la actividad científica y tenía claro



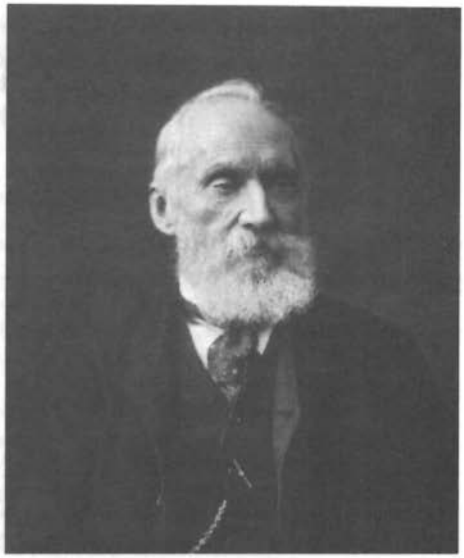




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
El químico escocés William Ramsay, premio Nobel de Química de 1904, trabajando en su laboratorio.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
William Thomson, lord Kelvin, conocido, entre otras cosas, por sus estudios sobre la edad de la Tierra.

FOTO INFERIOR:
En 1932, varios físicos destacados se reunieron en Münster, Alemania. Sentados, de izquierda a derecha: James Chadwick, Hans Geiger y Ernest Rutherford. De pie: George de Hevesy, Elisabeth Geiger, Lise Meitner y Otto Hahn.

que su estancia en Canadá iba a ser tan breve como fuera posible. Así se lo expuso a su mujer: «No creo que te importe que permanezca en Canadá durante unos años más, pero entre tú y yo, no me veo estableciéndome aquí, ya que espero regresar a Inglaterra algún día».

«Si quiero tener una oportunidad para el premio Nobel en los próximos años he de mantener mi trabajo en marcha.»

— PALABRAS DE RUTHERFORD EN UNA CARTA A SU ESPOSA EN 1905.

También comunicó a su mentor J.J. Thomson la desazón intelectual que le suponía encontrarse tan lejos del Reino Unido:

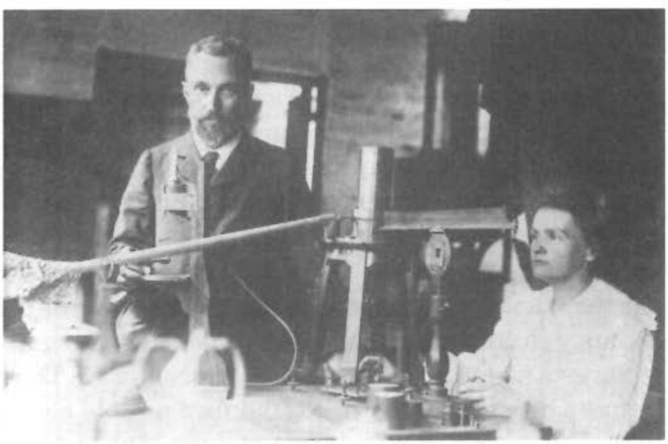
> Después de los años transcurridos en Cavendish, me siento alejado de las cuestiones científicas, y echo a faltar enormemente las oportunidades de reunirme con personas interesadas en física. Fuera del pequeño círculo del laboratorio es muy raro que escuche a alguien decir lo que se está haciendo en alguna parte.

Sin embargo, el puesto le daba la oportunidad de tener unos ingresos suficientes como para poder mantener a una familia. Por ese motivo, un año después de llegar a Montreal se dirigió a San Francisco para tomar desde allí un barco de vapor que le condujo, tras un mes de viaje, a Nueva Zelanda, con el objetivo de casarse. Rutherford contrajo matrimonio en 1900, y aprovechó su estancia allí para entregar la documentación necesaria a la Universidad de Nueva Zelanda con el fin de recibir el título de doctor. Después de una luna de miel por Estados Unidos y Canadá —que Rutherford aprovechó para recoger muestras de elementos radiactivos para sus posteriores investigaciones—, la joven pareja regresó a Montreal. En 1901 nació la que sería su única hija, Eileen Rutherford.

En 1903 Rutherford publicó parte de su teoría de la radiactividad, y ese mismo año se dirigió a Europa, donde se le concedió el honor de ser nombrado miembro de la Royal Society. Ese viaje fue muy importante para Rutherford, ya que le dio la oportunidad de conocer personalmente a todos aquellos científicos que habían

LA RADIACTIVIDAD Y EL CÁNCER

Los Curie fueron los primeros en sufrir literalmente en su propia piel los efectos de la radiactividad, experimentado consigo mismo los efectos nocivos de la exposición del cuerpo humano. Era habitual entre los científicos de la época que guardaran los tubos con sales de radio en el bolsillo y posteriormente se les enrojeciera la piel. Pierre Curie observó también que tras una larga exposición al radio, la piel cada vez se enrojecía más, se inflamaba y acababa por desprenderse. Pierre tenía numerosos dolores y Marie sufrió cataratas y un aborto probablemente por efecto de la exposición al radio. Rutherford, por el contrario, jamás manifestó problemas de salud, a pesar de haberse expuesto en innumerables ocasiones a los efectos de la radiación. La sociedad también acabó sufriendo las consecuencias de la radiactividad. Los curiosos fenómenos asociados al radio, como el hecho de que fuera luminoso por la noche, fue aprovechado para instrumentos militares. Entre 1918 y 1928 se empezó a comercializar un producto llamado Radithor, que contenía trazas de radio, con el que se prometía mayor longevidad, aunque en realidad envenenó a la población. Aparecieron otros compuestos que aseguraban que eran capaces de evitar la caída del cabello, entre otras ventajas que no eran más que fraudes. Marie Curie fue una de las primeras científicas en darse cuenta de que si la radiación podía matar células sanas, también podía hacer lo mismo con células enfermas, como las cancerosas, para evitar que se reprodujeran, como efectivamente ocurre. Estaba abriendo las puertas a la radioterapia.



Pierre y Marie Curie en su laboratorio de París, donde realizaron algunos de sus descubrimientos más trascendentales.

estado entre los pioneros en la carrera por la radioactividad, entre los que se encontraban los Curie. En junio de 1903, Ernest y su esposa Mary llegaron a París y el científico neozelandés recordaría de la siguiente manera esa estancia:

> Durante el verano visité al Profesor y Madame Curie en París, y encontré que esta recibía el grado de doctor en Ciencias el día de mi llegada. Por la tarde, mi viejo amigo, el profesor Langevin, nos invitó a mi esposa, a mí, a los Curie y a Perrin a cenar. Después de una animada velada, nos retiramos sobre las once al jardín, donde el profesor Curie mostró un tubo recubierto en parte con sulfuro de cinc y que contenía una gran cantidad de radio en una solución. La luminosidad resultaba brillante en la oscuridad y fue un final espléndido para un día inolvidable. Entonces no pudimos evitar observar que las manos del profesor Curie se encontraban en un estado muy inflamado y penoso debido a la exposición a los rayos del radio. Aquella fue la primera vez que vi a Curie. Su muerte prematura en un accidente callejero en 1906 constituyó una gran pérdida para la ciencia y particularmente para la ciencia de la radiactividad, en tan rápido desarrollo.

Al año siguiente, Rutherford viajó de nuevo a Europa, y aprovechó para impartir dos charlas. Una de ellas fue la conferencia bakeriana anual de la Royal Society, un gran honor que aprovechó para exponer sus ideas sobre la desintegración radiactiva. La segunda charla versó sobre la edad de la Tierra; como ya se ha comentado, entre la audiencia se encontraba lord Kelvin.

Al estar constituyéndose la radiación y la física de partículas como una una nueva disciplina física, se vio la necesidad de que existiera también un manual de texto. Rutherford se puso manos a la obra y en 1904 apareció *Radiactividad*, el primer libro de texto sobre esta materia. La obra estaba dedicada a J.J. Thomson, quien después de leerlo aseguró: «Rutherford no solo ha extendido los límites del conocimiento de esta materia, sino que ha anexionado una nueva provincia».

La fama de Rutherford se empezó a extender por todo el mundo, y algunos estudiantes brillantes optaron por dirigirse a

McGill para poder trabajar junto al genio neozelandés. Uno de esos estudiantes fue el químico alemán Otto Hahn, futuro premio Nobel de Química en 1944 por sus investigaciones sobre la fisión nuclear. En 1906, la revista *Nature* (junto con *Science*, la publicación científica más importante de temática no específica) dedicaba un artículo a Rutherford en el que se afirmaba lo siguiente, en relación con sus estudiantes:

> El profesor Rutherford inspira la investigación de estudiantes con su propio entusiasmo y energía. Sigue los resultados que obtienen de forma cercana y se siente tan satisfecho con los descubrimientos de estos como con los suyos propios. Es la generosidad personificada otorgando un completo crédito a aquellos que hacen investigación bajo su tutela.

Cualquiera de sus colaboradores fue testimonio de la exactitud de las palabras de este artículo. Tanto Soddy, como Marsden o Geiger, y también James Chadwick pudieron comprobar que Rutherford les dio el crédito completo por sus investigaciones, a pesar de estar fuertemente respaldadas por ese torrente de energía que era su maestro.

Al mismo tiempo que su fama se acrecentaba, empezaron a llegarle ofertas de universidades estadounidenses, aunque en ese momento aún no tenían suficiente prestigio y ofrecían una dotación económica escasa. También desde Londres le llegó otra oferta poco tentadora, que por tanto rechazó. En 1906, finalmente, le llegó la oferta que estaba anhelando. La Universidad de Mánchester tenía uno de los mejores laboratorios de Física gracias al buen hacer del director del departamento, Arthur Schuster. Este profesor pensaba ya en retirarse, pero puso una condición: que su puesto fuera ocupado por Rutherford. Era la oportunidad que Ernest estaba esperando para regresar al Reino Unido y contar con un laboratorio de primer nivel con el que seguir realizando sus pioneras investigaciones. Incluso pensó en Harriet Brooks —una de las primeras estudiantes de posgraduado de McGill que, después de trabajar junto a Rutherford en la determinación de la masa atómica del radón, también colaboró con Marie Curie—

para que la acompañara ocupando una de las becas. Brooks, sin embargo, rechazó la oferta, pues iba a contraer matrimonio, lo que supuso el definitivo abandono de su carrera profesional.

Incluso el periódico *The New York Times* se hizo eco de su marcha de Canadá. En McGill, Rutherford había llegado a publicar 69 trabajos científicos, de los que firmó 19 junto a Soddy. Había logrado fama mundial, con un enorme reconocimiento por su trabajo, pero su marcha no supondría ni mucho menos que su rendimiento fuera a flaquear.

«Un enorme almacén de energía latente reside en los mismos átomos radiactivos.»

— Ernest Rutherford.

Rutherford llegó a Mánchester en otoño de 1907 y su primera preocupación fue disponer de material radiactivo. Desde el Instituto del Radio de la Academia Austriaca de las Ciencias le ofrecieron compartir con Ramsay parte de ese material. Tras algunas disputas con este último —Ramsay solo pensaba dar a Rutherford muestras una vez que él las hubiera usado—, desde Viena acabaron por ofrecer a Rutherford muestras independientes. Otro aspecto importante fue contar con un ayudante de primer nivel, y esta vez lo encontró en Hans Geiger, que había llegado de Erlangen (Alemania) para trabajar junto a Schuster en 1906.

En Mánchester, las primeras investigaciones de Rutherford estuvieron dedicadas al análisis de las partículas alfa, iniciado en 1902. Quiso asegurarse de su composición, que ya había adelantado años antes, y también quiso comprobar que era un tipo de radiación idéntica con independencia de la fuente radiactiva de la que brotara. Se trataba de una hipótesis que tampoco contaba con apoyo experimental, y era necesario confirmar este aspecto.

Rutherford y Geiger idearon un tubo que permitía contabilizar rayos alfa, aparato que tras algunas mejoras añadidas por el ayudante pasó a llamarse *contador Geiger*. Gracias al contador pudieron establecer el número de partículas que emergían de una fuente radiactiva. Como ya podían determinar la carga total que

producía el flujo de partículas, ello les permitió averiguar la carga de una partícula con tan solo dividir la carga total capturada por el número de partículas captado. Con este número en la mano, la identificación de la radiación alfa con el ión helio quedó fuera de toda duda; es decir, las partículas alfa eran núcleos de helio, átomos de helio que carecían de sus dos electrones. En esos momentos, por fin había hallado su corroboración experimental, que posteriormente complementó con un experimento aún más refinado en el que se podía apreciar el espectro de absorción de la radiación alfa, que de nuevo era idéntica al espectro del helio. Precisamente cuando estaba enfrascado en estos experimentos, llegó la noticia de que iba a recibir el ansiado premio Nobel de Química de 1908. Le fue otorgado por «sus investigaciones sobre la desintegración de los elementos y la química de las sustancias radiactivas».

Después de viajar a Estocolmo, su mujer refirió por carta a unos familiares la siguiente anécdota: «Explicó que había tenido que trabajar durante largo tiempo con transformaciones de duración variable pero que ninguna había sido tan rápida como la suya propia, que en un instante había pasado de ser físico a ser químico». En la charla, explicó sus indagaciones sobre los rayos alfa, iniciadas en Cavendish, cuando fue el primero en prestar atención a este tipo de radiación, y luego en McGill, cuando sospechó que podían ser partículas de helio —dado que en los yacimientos de minerales radiactivos había gran cantidad de helio, como había observado Ramsay— y ya sus más recientes investigaciones en Mánchester, donde corroboró experimentalmente esta suposición.

Rutherford fue siempre una persona austera, en consonancia con sus orígenes humildes, pero esta vez aprovechó el dinero recibido en el premio para adquirir un automóvil. Uno de sus antiguos alumnos, Otto Hahn, preparó para su maestro un recorrido triunfal por distintas universidades alemanas, en las que dio charlas y se reunió con numerosos científicos, a los que, en algunos casos, solo conocía de nombre, por su trabajo publicado.

Cuando regresó a su trabajo en el laboratorio de Mánchester, Rutherford rápidamente logró el otro gran éxito de su carrera

profesional y que ya se ha descrito en el primer capítulo de la presente obra: la detección del núcleo atómico mediante rayos alfa. Estas radiaciones se habían convertido casi en un talismán para el éxito, un timón que guiaría la mayor parte de su carrera científica.

CAPÍTULO 4

Hacia la escisión del núcleo

El camino para romper el núcleo atómico se inició con un sencillo experimento con el que Rutherford arrancó algunos protones del núcleo de un átomo de nitrógeno. Sin embargo, esta forma de hacer ciencia con pocos medios e instrumentación sencilla estaba llegando a su límite. Rutherford fue consciente de que para realizar nuevos descubrimientos era necesario impulsar la Gran Ciencia, basada en experimentos como los realizados hoy en los aceleradores de partículas.

Para saber cómo funcionan las cosas, lo mejor es desmontarlas: es lo que haría cualquier niño curioso, por ejemplo, ante un aparato eléctrico. Rutherford supo aplicar ese mismo espíritu deconstructor hasta el núcleo atómico. Desmenuzarlo sería la manera de acceder a aquello que mantenía celosamente oculto a los ojos humanos.

Rutherford llegó a Mánchester en 1907, al año siguiente recibiría el premio Nobel y en 1909 ya estaba trabajando junto a Geiger y Marsden en el modelo atómico, tema que lo mantuvo ocupado hasta 1912. En esa época, Bohr se incorporó al equipo para introducir las teorías cuánticas al mundo subatómico. Poco después estalló la Primera Guerra Mundial (1914-1918), conflicto que tuvo una enorme repercusión también en el mundo científico: algunos de sus artífices más prometedores y otros destacados fallecieron en la contienda, y al compás de la guerra los proyectos científicos se desvanecieron como un sueño, con la destrucción de sus instalaciones, la mengua de las inversiones y la disolución de grupos de trabajo.

Marsden, colaborador de Rutherford, emigró a Nueva Zelanda después de la Gran Guerra. Rutherford movió los hilos necesarios para que pudiera incorporarse sin problemas en la Universidad de Nueva Zelanda como catedrático de Física. Sin embargo, antes de partir del Reino Unido en 1915, estuvo trabajando hasta el último

momento en una serie de experimentos dirigidos por el profesor. Antes de su marcha, el último experimento que desarrolló consistía en bombardear los átomos de nitrógeno gas con partículas alfa. Esta vez, Marsden observó que de dicho núcleo emergían unas partículas que no fue capaz de identificar. En principio, creyó que se trataba de un nuevo tipo de haces radiactivos que pasarían a engrosar a los ya conocidos hasta entonces: la radiación alfa, beta y gamma. Sus investigaciones quedaron interrumpidas en este punto por tener que incorporarse al frente.

DESGAJANDO EL NÚCLEO

Rutherford, sin embargo, no había quedado satisfecho con esa hipótesis preliminar. La interpretación de Marsden no le convencía, y por esa razón le pidió permiso para proseguir él mismo con los experimentos. Tras incorporar algunas mejoras al sistema experimental, siguió lanzando partículas alfa al nitrógeno gaseoso y pudo comprobar cómo tintinaba la pantalla detectora debido a ciertas partículas no identificadas. Pero esta vez pudo comprender que no era un nuevo tipo de radiación, sino que se trataba en realidad de núcleos de hidrógeno (con una carga positiva). La hipótesis de Marsden era, pues, errónea, pero el hallazgo requería comprender el origen de dicha emanación. Todo encajó con una armonía extraña, al tiempo que sencilla y maravillosa, cuando constató que su origen era el propio núcleo de los átomos de nitrógeno. En el proceso, los átomos de nitrógeno se transmutaban, simultáneamente, en oxígeno. Ante sus ojos tenía lugar una singular danza, aunque con una baja eficiencia: solo por una de cada trescientas mil partículas alfa lanzadas se producía la conversión de nitrógeno en oxígeno. En todo caso, se trataba de una cantidad suficientemente significativa debido a la baja densidad de átomos de nitrógeno, al estar en estado gaseoso.

Ernest concluyó que las partículas alfa colisionaban y eran absorbidas por los núcleos de nitrógeno. Como resultado, el núcleo resultante era de naturaleza inestable, por lo cual una cierta

partícula procedente del núcleo debía ser emitida para estabilizarlo. Estas partículas desprendidas del núcleo, de carga positiva y de características idénticas con el núcleo del hidrógeno, eran lo que hoy conocemos como *protones*. Por primera vez en la historia se había logrado identificar las partículas que componían el núcleo. El nombre de «protón» fue establecido en 1920.

«Los protones dan al átomo su identidad, los electrones su personalidad.»

— Bill Bryson (1951), escritor científico británico.

Si echamos una ojeada a la tabla periódica, veremos que oxígeno y nitrógeno se encuentran en posiciones contiguas. En ese sentido, su diferencia reside fundamentalmente en un único protón. Para hacer las cuentas en el experimento de Rutherford, diríamos hoy que al nitrógeno primero se le añadían dos protones procedentes de las partículas alfa y luego había que restarle el que seguidamente era emitido. No era más que una operación de cálculo básica, pero deducir aquello tenía una profunda trascendencia en la comprensión de la naturaleza de la materia. Rutherford aplicó su habitual método para diseñar y ejecutar los experimentos de modo que su interpretación fuera concluyente e inequívoca y pudo establecer de forma precisa algunas nuevas ideas sobre los átomos. Para empezar, por primera vez se podía identificar la carga positiva de los átomos con los protones. El número de protones del núcleo de un átomo determina el tipo de elemento que es el átomo (incrementar o disminuir este número modifica, por tanto, la naturaleza de dicho elemento). En segundo lugar, esto significaba que había dividido el contenido del núcleo, aunque solo hubiese desgajado un pequeño fragmento. Y lo había logrado artificialmente con el bombardeo de proyectiles tipo alfa. En consecuencia, en este proceso se producía por primera vez en la historia una transmutación de los elementos mediante una técnica artificial.

En diciembre de 1917, Rutherford escribió a Bohr informándole de estos nuevos descubrimientos:

> He obtenido unos resultados que creo que tendrán una gran importancia. He detectado —y contado— los átomos más ligeros puestos en movimiento por partículas alfa y los resultados creo que arrojan mucha luz sobre el carácter y la distribución de las fuerzas próximas al núcleo [...]. Estoy intentando romper el átomo con este método... Mis mejores deseos para que paséis una feliz Navidad.

Aunque a sus más estrechos colaboradores pronto pudo transmitirles las noticias de sus descubrimientos, fue necesario esperar a que finalizara la guerra para que concluyera el veto sobre las publicaciones científicas. Vigente durante el conflicto, era una medida excepcional para evitar que una potencia rival pudiera aprovechar con fines bélicos un resultado científico. Rutherford publicó sus resultados en una serie de artículos en la prestigiosa revista científica inglesa *Philosophical Magazine*. Entre las conclusiones de su artículo «Colisión de partículas alfa con átomos ligeros» se podía leer:

> A partir de los resultados obtenidos hasta el momento es difícil ignorar la conclusión de que el gran rango de átomos que surgen de la colisión de partículas alfa con el nitrógeno no son átomos de nitrógeno, sino probablemente átomos de hidrógeno [...]. Si este fuera el caso, tendríamos que concluir que el átomo de nitrógeno se desintegra bajo las intensas fuerzas desarrolladas en una colisión cercana con una partícula alfa rápida y que el átomo de hidrógeno que se libera era una parte constituyente del átomo de nitrógeno.

En este texto también hay sentencias visionarias y acertadas de lo que iba a ocurrir en los años posteriores:

> Si pudieran conseguirse partículas alfa —o proyectiles similares— de mayor energía para futuros experimentos, sería esperable la ruptura de la estructura del núcleo atómico de la mayoría de los átomos en elementos más ligeros.

Rutherford fue capaz de entrever que la física de partículas experimental se orientaría hacia la construcción de aceleradores

de partículas. La guerra, sin embargo, lo retrasó todo. Hubo que esperar más de una década para que sus ideas se tornaran realidad.

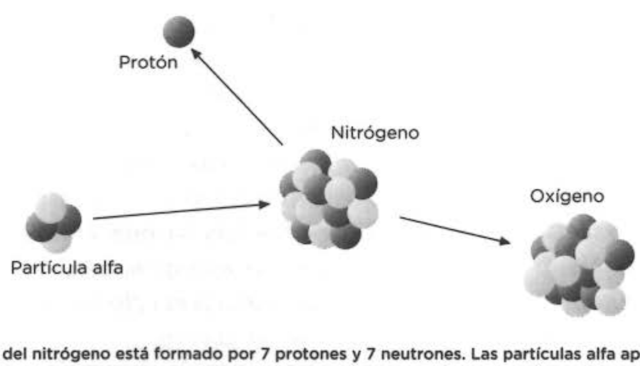
Numerosos medios se hicieron eco de estos resultados tras su publicación, porque parecía que de ellos se podía desprender también la conclusión de que en el mundo subatómico contenía almacenada una ingente cantidad de energía que tarde o temprano

LAS PARTÍCULAS ALFA Y EL NITRÓGENO

Las partículas alfa constan de 2 protones y 2 neutrones (es decir, análogo a los núcleos de helio). Al proyectarlos contra los núcleos de nitrógeno —que cuenta con 7 protones—, los protones de las partículas alfa pueden llegar a colisionar con el núcleo atómico e integrarse en el núcleo de forma transitoria; el núcleo entonces alberga 9 protones. Como producto final de la desintegración, 8 de ellos se mantienen unidos formando el núcleo del átomo de oxígeno, mientras que el protón restante sale emitido. El proceso, en el se incluye también el número de neutrones, aunque en aquella época esta partícula aún no se había descubierto, se puede expresar del siguiente modo:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}p.$$

(El número inferior a la izquierda del símbolo de cada elemento representa el número atómico o número de protones, mientras que el superior hace referencia al número de partículas del núcleo, es decir, a la suma de protones y neutrones. Véase el anexo A.)



El núcleo del nitrógeno está formado por 7 protones y 7 neutrones. Las partículas alfa aportan 2 protones y 2 neutrones. Los productos de la reacción son un átomo de oxígeno (O) con 8 protones y 9 neutrones, y un protón (p^+).

llegaría a ser accesible. En diarios como el *The New York Times* se pudo leer:

> Ahora sabemos, por el calor que se libera en la desintegración, que la cantidad de energía guardada en el núcleo es [...] millones de veces mayor que la generada por cualquier reacción química, como la combustión de carbón.

El descubrimiento de Rutherford pondría a nuestra disposición «una fuente de energía casi inagotable que transcenderá por completo cualquier cosa conocida hasta ahora».

En esa época, Rutherford estaba colaborando con la marina del Reino Unido. Alternaba sus investigaciones con largas y tediosas reuniones. En una ocasión, sin embargo, envió el siguiente telegrama para excusar su ausencia: «Si, como tengo razones para creer, he desintegrado el núcleo de un átomo, esto tiene mucha más significación para mí que la guerra». Rutherford había desgajado un fragmento del núcleo del átomo mientras el mundo se había enzarzado literalmente en una guerra.

LA PRIMERA GUERRA MUNDIAL

Mientras que el Imperio austrohúngaro conquistaba Serbia, Alemania se desplegaba sobre Francia, en un rápido y demoledor ataque que situó al ejército a las puertas de París. Empezó entonces la guerra de trincheras, una trampa mortal para millones de jóvenes, donde avanzar unos pocos metros tenía un coste en vidas humanas y materiales inimaginables. El número de cadáveres y víctimas en ese frente —muchos de ellos abandonados en la campiña francesa— fue de cientos de miles, aunque, en realidad, estos solo representan una pequeña parte de los nueve millones de víctimas con las que se saldó la guerra.

Esta capacidad para matar y destruir alcanzada por los ejércitos se debía principalmente al uso de nueva tecnología militar en la que se aplicaban los últimos descubrimientos científicos. Fritz

Haber, científico alemán de origen judío, realizó una de las contribuciones más terroríficas cuando desarrolló el gas mostaza. Este gas, que estuvo a disposición del ejército alemán, era capaz de provocar graves quemaduras y ampollas. Cuando décadas más tarde se alzó el nazismo con el poder, Haber se vio obligado a escapar de Alemania, para finalmente instalarse en Palestina. Rutherford, que era un defensor del universalismo en ciencia, no pudo perdonarle jamás que inventara ese mortífero gas y se negó a establecer ningún contacto a pesar de haber caído en desgracia en su propio país.

La aplicación del desarrollo científico no solo tuvo una vertiente destructiva. En el frente francés, una ambulancia conducida por Marie Curie, junto a su hija Irène, y en la que se había instalado un equipo de rayos X, sirvió para hacer radiografías y así diagnosticar de manera más precisa las causas y el estado de las heridas de los soldados. En total llegaron a haber veinte unidades de la marca Renault dotadas con esta tecnología. Se estima que se hicieron aproximadamente un millón de radiografías.

Con la guerra, las universidades cesaron su actividad. En París, la École Normale Supérieure se convirtió en un hospital. En Oxford, apenas quedaron varios centenares de alumnos. En la Universidad de Mánchester, el equipo de Rutherford también fue diezmado. Jóvenes que fueron enviados a filas y sacrificados en las trincheras, aunque con el tiempo el comando de los ejércitos reconoció que estas mentes privilegiadas podían también contribuir a diseñar nueva tecnología bélica. Sin duda, el conflicto interrumpió proyectos y carreras científicas prometedoras, y en muchos casos de forma definitiva.

LA CIENCIA, TAMBIÉN EN GUERRA

«La guerra ha forzado a la ciencia a ir al frente», afirmó, de forma muy descriptiva, el astrónomo estadounidense George Ellery Hale (1868-1938). Fue realmente así, y ello no tiene que verse necesariamente como algo del todo negativo. Antes de que estallara la guerra, los centros académicos actuaban con independencia de la industria y del gobierno. Tras la Gran Guerra, este hecho cam-

bió para siempre: los centros de investigación gozaron a partir de entonces del apoyo del Estado en forma de generosas subvenciones. Los vínculos de la industria y las instituciones académicas también se estrecharon gracias a que la investigación científica se entendió como un motor de la economía a través de la innovación. Los vientos de la guerra modelaron en este sentido el mundo en el que vivimos en la actualidad.

La sinrazón de la guerra, por otro lado, también provocó grietas profundas en las relaciones entre los científicos de los países de la Triple Entente y los de la Triple Alianza. Investigadores que habían trabajado juntos súbitamente se vieron enfrentados participando en proyectos que perseguían la aniquilación del otro. La intromisión de la guerra, con sus proclamas nacionalistas y llamamientos patrióticos, fue dramática para el desarrollo científico del momento.

La barbarie que infligió el ejército alemán en tierras francesas, donde se habían llevado a cabo numerosas atrocidades, sin respetar vidas humanas, ni tampoco instituciones históricas o bienes culturales, fue muy criticada en todo el mundo. Como reacción, un grupo formado por 93 intelectuales y científicos alemanes —entre los que destacaba Max Planck, pues finalmente retiró su apoyo— elaboraron un manifiesto defendiendo a sus soldados y tachando las críticas de propaganda. La mayoría de ellos creían honestamente que sus soldados, a los que se les atribuía una educación excelente, no podían haber cometido los destrozos y crímenes gratuitos que se les atribuían. Una vez finalizada la guerra, estos encontronazos entre científicos alemanes por un lado, y franceses e ingleses por el otro, desembocaron en la expulsión de los investigadores alemanes de las principales instituciones científicas europeas.

También hubo científicos que trataron de mediar para lograr construir puentes y recuperar el discurso unificado e internacionalista propio de la ciencia. Ante las constantes proclamas para despedir de las instituciones científicas inglesas o francesas al personal de origen alemán, personalidades como Thomson, que aún ejercía como presidente del laboratorio Cavendish, hicieron caso omiso.

JAMES CHADWICK



Nacido en 1891 en Mánchester, Chadwick estudió en la Universidad de Cambridge y luego en la de Mánchester, donde conoció a Rutherford. Gracias a los contactos que mantenía su maestro con Geiger, Chadwick tuvo ocasión de ir al instituto técnico de Berlín donde este trabajaba. Cuando estalló la Primera Guerra Mundial, fue acusado de espionaje y trasladado a un campo de concentración. Después de la guerra, Rutherford lo acogió en su propia casa y pudo ofrecerle una posición en Mánchester. Más tarde, creó un cargo como asistente al director en el laboratorio Cavendish especialmente para él. En mayor parte, su función era descargar de tareas administrativas a Rutherford, y pudo alternar esta labor con sus propias investigaciones, dedicadas al bombardeo de núcleos atómicos mediante partículas alfa. En 1932, inició sus estudios con el berilio, inspirándose en el trabajo realizado por el matrimonio Irène Curie y Frédéric Joliot, gracias a lo cual llegó a enunciar el descubrimiento del neutrón, la otra principal partícula presente en el núcleo de los átomos. Los neutrones se convertirían por su parte en una nueva herramienta para la investigación, dado que su neutralidad de carga los hace «invisibles» a los efectos de los campos eléctricos, y ello posibilita que permitan colisionar con los núcleos atómicos con más facilidad. Por este trabajo obtuvo el premio Nobel de Física en 1935, año en que optó por trasladarse a la Universidad de Liverpool, donde le garantizaron que podría construir un ciclotrón, obra que no aprobaba Rutherford (el ciclotrón había sido un desarrollo estadounidense, y desde el Viejo Continente se seguía contemplando con cierta displicencia cualquier propuesta llegada de Estados Unidos). Seguidamente, participó en numerosos proyectos para investigar sobre la construcción de una bomba nuclear. En 1945 fue nombrado caballero y al año siguiente ocupó el puesto de asesor de la comisión de energía atómica de las Naciones Unidas. James Chadwick falleció el 24 de julio de 1974.

Algunos de los mejores colaboradores de Rutherford eran de origen alemán, como Hans Geiger y Otto Hahn, con quienes siguió en contacto. Con el propio Geiger llegó a escribirse expresándole

su deseo de que la guerra no quebrara los vínculos que siempre habían mantenido. La ciencia tenía que estar por encima de cualquier frontera. Por esta razón, en 1926, cuando Rutherford ya era presidente de la Royal Society, hizo lo posible para que el veto a los científicos alemanes desapareciera.

Otto Hahn participó en el programa para fabricar el letal gas mostaza, mientras que Geiger, tras ser herido, tuvo que regresar a la guerra cuando se curaron sus heridas. Afortunadamente, sobrevivió a cuatro años infernales en el frente. Geiger, además, hizo lo posible para ayudar a los científicos extranjeros apresados en Alemania, como ocurrió con James Chadwick. Formado junto a Rutherford, Chadwick logró una beca para ampliar sus estudios en Alemania junto a Geiger. Este premio, sin embargo, se convirtió muy pronto en pesadilla. Al estallar la guerra, fue apresado y trasladado a un campo de concentración —que era en realidad, un antiguo hipódromo— en las proximidades de Berlín, donde estuvo recluido tres años. Estas penosas circunstancias no detuvieron su impulso irrefrenable a investigar con la radiactividad. Logró proveerse de fuentes de radiación y de un laboratorio casero, por ejemplo, aprovechando productos de consumo como un tipo de pasta de dientes compuesto por trazas de torio. La radiactividad se había convertido en un reclamo publicitario en una época en la que se ignoraba las terribles secuelas que supone cierto nivel de exposición a la misma. El contenido en torio se usó como fuente de radiación. Entre los materiales que hizo servir para realizar sus experimentos había también mantequilla rancia. En esas circunstancias, contó además con el apoyo de Geiger, que trató de proporcionarle todo lo que necesitara para hacer su confinamiento lo más confortable posible.

MUERTE EN EL FRENTE

El físico y químico Henry Moseley (1887-1915) fue uno de los científicos más brillantes de su generación, aunque no pudo llegar a demostrar su talento porque falleció en la guerra. De origen británico y de familia adinerada, Moseley fue capaz de enunciar una de

las regularidades más fundamentales escondidas tras el orden de la tabla periódica. Expresado en sus propias palabras, el principio dice lo siguiente:

> Hay una cualidad fundamental en el átomo que se incrementa con pasos regulares cuando pasamos de un elemento al siguiente. Esta cualidad solo puede ser la carga del núcleo positivo central.

Las ideas de Moseley fueron anteriores al propio descubrimiento del protón por parte de Rutherford, y es obvio que este último las tuvo presentes cuando finalmente fue capaz de detectarlo.

> «Esto muestra que el interior de todos los átomos es muy parecido, y a partir de estos resultados será posible saber algo más de lo que está hecho tal interior.»
>
> — Henry Moseley, en referencia a su concepto de número atómico.

Moseley llegó a la conclusión de que, al observar las longitudes de onda de rayos X emitidos por los átomos, estas mostraban una relación directa con el número de cargas positivas, un número que acabó por conocerse como *número atómico* (representado con la letra Z). La diferencia entre el número de protones era lo que diferenciaba un elemento de otro y lo que determinaba, por tanto, las propiedades fisicoquímicas del elemento. De esta manera, el número atómico pasaba a sustituir al peso atómico, que hasta ese momento los químicos habían tomado como referencia fundamental para identificar un elemento, y determinaba sus características químicas.

Mientras Rutherford y Moseley asistían a un simposio científico en Nueva Zelanda, estalló la guerra. Moseley, que había sido presentado ante la comunidad científica como un investigador con un gran futuro, tuvo que regresar inmediatamente a Gran Bretaña para incorporarse al frente. Rutherford, que evidentemente por su edad estaba exento de intervenir directamente en el conflicto, trató de mantener su agenda, que incluía recibir diversos premios

e impartir algunas charlas, pero movilizó a sus contactos en las altas esferas para lograr que su discípulo pudiera regresar de filas cuanto antes y retornar a sus experimentos. Existía una razón eminentemente práctica para convencerles de que estos jóvenes brillantes entre los que se contaba Moseley no tenían que ir a las trincheras. Por primera vez, la guerra estaba condicionada por los descubrimientos científicos, y precisamente eran esos jóvenes investigadores los que podrían desarrollar de forma más eficiente la tecnología militar necesaria para obtener la victoria.

Rutherford contactó con cargos influyentes en el ejército. Finalmente, tras explicarles que Moseley sería más útil a su país en el laboratorio que en el campo de batalla, hubo un cambio de actitud y el ejército concedió permiso al oficial Moseley para abandonar el frente. Por desgracia, fue demasiado tarde. En la batalla de Galípoli, mientras estaba usando el teléfono —otra novedosa invención que fue aprovechada para la guerra— para pedir ayuda, recibió un impacto de bala en la cabeza y falleció en el acto. Rutherford se lamentó amargamente de esta pérdida: «Es una tragedia nacional», aseguró.

EN LA MARINA REAL

Rutherford aceptó la responsabilidad de liderar un equipo de la Marina Real encargado de diseñar la defensa antisubmarina. Para los alemanes, los submarinos se habían convertido en una tabla de salvación, ya que era la manera de sortear la escasez de recursos debido al bloqueo al que los sometían los aliados. Este tipo de buque era capaz de torpedear y hundir cualquier barco, de modo que detectarlos acabó siendo una prioridad.

El ejército británico tradicionalmente recibía con displicencia las sugerencias provenientes del mundo académico y no hizo una excepción con Rutherford, que se vio obligado a asistir a las reuniones sin que su opinión se tuviera en cuenta. Sin embargo, no se trataba de una preocupación puramente británica. Franceses y estadounidenses también estaban detrás del desarrollo de la tecnología capaz de detectar submarinos.

Rutherford puso todo su empeño en la labor que se le había encomendado, a pesar de que todas sus recomendaciones cayeran en saco roto. Habilitó tanques de agua en el laboratorio y usó una pequeña embarcación facilitada por el ejército —la única concesión que se le otorgó para realizar su investigación—, que utilizó durante largas jornadas en el mar para comprobar sus desarrollos. Para calibrar los micrófonos subacuáticos en el laboratorio, no tuvo mejor alternativa que usar a un lingüista de la universidad que poseía un gran sentido auditivo. Mientras Rutherford lo sostenía por los pies, el lingüista mantenía su cabeza y su cuerpo en el interior del agua, atento a los sonidos que se iban originando.

Durante dos años, y después de empaparse de la obra científica de lord Rayleigh, que había escrito uno de los tratados fundamentales sobre acústica, Rutherford desarrolló finalmente el hidrófono. Este aparato, que se convirtió en su primera y última patente, permitía captar sonidos debajo del agua y, por tanto, en principio tendría que ser capaz de detectar la presencia de submarinos. Se basaba en un método pasivo de detección que aprovechaba materiales piezoeléctricos para convertir las señales sonoras en eléctricas. A pesar de sus limitaciones —el ruido de todas las embarcaciones donde se instalaba el aparato lo inutilizaba, de modo que para hacer las comprobaciones era necesario parar las máquinas—, se usó ampliamente a finales de la Primera Guerra Mundial.

En 1917, una delegación liderada por Rutherford viajó primero a París para compartir sus avances con el hidrófono con el resto de los países aliados. Allí se encontró con Langevin, su viejo amigo, que también trabajaba en la detección de submarinos, y también pudo ver a Marie Curie (unida sentimentalmente a Langevin, lo que provocó un escándalo en la sociedad francesa). Más tarde, la comisión se trasladó a Estados Unidos, donde Rutherford pudo mostrar los avances realizados en su precedente del sónar a los estadounidenses (que aunque tenían los medios económicos y materiales para desarrollar estas ideas, iban entonces un paso por detrás en conocimiento científico). Uno de los consultores del grupo de trabajo estadounidense era un envejecido Thomas Alva Edison.

Por su parte, Rutherford quiso mejorar su invento cuando se dio cuenta de que un sistema activo que fuera capaz de emitir sonidos con la suficiente energía lograría que las ondas sonoras rebotaran en los cuerpos en movimiento en el agua. Aquí se encuentra el precedente del sónar, y estas ideas de Rutherford fueron efectivamente aprovechadas por los estadounidenses, quienes en la Segunda Guerra Mundial pudieron combatir a los navíos alemanes con los sónares.

> «Fui recibido muy bien por el viejo hombre, que se mostraba tan entusiasmado como lo estaría un colegial.»
>
> — Palabras de Rutherford sobre su encuentro con Thomas Alva Edison en Estados Unidos.

La decepción sobre el entorno militar británico y la ausencia de apoyo económico para desarrollar sus ideas contribuyeron a incrementar su escepticismo, hasta que finalmente pudo volver a dedicarse a sus líneas tradicionales de investigación.

REGRESO AL CAVENDISH

Durante la guerra, el laboratorio Cavendish, que seguía bajo la dirección de J.J. Thomson, se había puesto al servicio de la institución militar. Se anularon clases y proyectos de investigación, de modo que el fin de la guerra supuso un inmenso reto para intentar volver a situar al laboratorio en el epicentro de la actividad científica de la época. Hacía falta ponerlo todo de nuevo en funcionamiento. Thomson acabó por aceptar un cargo en otra universidad, por lo que su plaza estaba vacante, y el mejor candidato a sucederle no podía ser otro que Rutherford.

En 1919, Rutherford terminó el año escolar en Mánchester y regresó a Cavendish. Ahora regresaba como director del laboratorio, después de obtener el premio Nobel y tras realizar alguno de los descubrimientos más memorables de la historia de la ciencia durante su época.

Rutherford tuvo que enfrentarse a un desafío de gran magnitud. Necesitaba, por un lado, obtener financiación, la cual acabó siendo en buena medida pública gracias al interés que la actividad científica había despertado en el órgano estatal durante la guerra. Por otro lado, Rutherford fue capaz de rechazar algunas fuentes de financiación privadas, en parte guiado por la convicción de que la investigación está unida a la carestía. Mantuvo la austeridad como una de las señas de identidad del centro, lo que en algunos casos despertó la incomprensión de sus colaboradores. Su propia carrera podía ser tomada como ejemplo de que con relativamente pocos medios se podía llegar muy lejos, aunque en ese momento empezó a entrar en crisis. Estaban surgiendo nuevas necesidades para la investigación que requerían presupuestos muy elevados, a menudo debido a necesidades de instrumental. Rutherford necesitó tiempo para convencerse de que si deseaba desentrañar los misterios que escondía el núcleo atómico, sería necesario disponer de dinero y de instalaciones.

Como director del laboratorio, Rutherford tuvo que gestionar también el incremento del número de estudiantes e investigadores y la ampliación de las instalaciones. Por encima de todo, dedicó tiempo al equipo de investigadores, se preocupó por sus problemas y ejerció un liderazgo indiscutible. Era muy exigente con los resultados, pero al mismo tiempo inspirador. De este modo, conseguía obtener el máximo rendimiento de sus estudiantes y unos resultados fuera de lo común. Tuvo la capacidad de rodearse siempre de los mejores, y de que los que le rodearan acabaran convirtiéndose al mismo tiempo en los mejores. A su alrededor se formó un vivero de futuros premios Nobel.

En aquella época, lo más urgente era ocuparse de los investigadores que trataban de rehacer su vida tras la guerra. Rutherford también tuvo que hacer frente a esa problemática, y en algunos casos hasta implicarse personalmente. Un ejemplo fue el de Chadwick, por quien siempre manifestó un gran aprecio. Al finalizar la guerra, Chadwick fue liberado de su encierro en el campo de concentración, en un estado físico lamentable y con una profunda depresión. Con solo veintisiete años, no se sentía con ninguna perspectiva clara de futuro. Rutherford se ocupó de

él y una década más tarde logró detectar el neutrón y obtener el premio Nobel.

«No tenemos dinero, así que tenemos que pensar.»

— Ernest Rutherford.

En ese equipo, que firmó una de las épocas estelares del centro Cavendish, era imprescindible un matemático. El desarrollo de la física cuántica se basaba en abstracciones matemáticas que requerían un gran dominio del cálculo y desarrollos matemáticos. Rutherford carecía de él, por lo que dio cabida en su laboratorio a uno de los mejores matemáticos de Cambridge, Ralph

LA HISTORIA DEL LABORATORIO CAVENDISH

El laboratorio Cavendish es una institución sin la que no se puede entender parte de la historia reciente de la ciencia, en especial la física moderna. Surgió en 1874, en plena Revolución industrial y en un momento de gran competencia económica entre el Reino Unido, Alemania y Francia. Se trataba de una época en la que existía la convicción de que era necesario preparar a jóvenes en la experimentación y en la aplicación práctica de las ideas científicas para así contribuir al desarrollo de nuevas industrias. En Berlín, ya se había construido un laboratorio de física experimental cuando Henry Cavendish, duque de Devonshire e industrial, accedió a financiar una cátedra en Cambridge que recibió su nombre. El primer director del laboratorio Cavendish fue el extraordinario físico escocés James Clerk Maxwell, quien contribuyó a dotar al laboratorio de los instrumentos experimentales necesarios para que pudiera funcionar. Uno de sus objetivos fue estandarizar la medición de la unidad de resistencia eléctrica, un estudio que contribuyó a que el laboratorio fuera visto como un lugar que se ocupaba de problemas de algún modo prácticos. Maxwell falleció prematuramente cinco años más tarde y fue sustituido por lord Rayleigh, quien puso en marcha un curso de física experimental que pasó a constituir uno de los ejes centrales de la institución. Rayleigh renunció al cargo en 1884, y entonces fue sustituido por un joven físico y matemático casi desconocido, J.J. Thomson, que puso a la institución en busca de la conquista del átomo. A pesar de las estrecheces económicas en las que vivía el centro —solo se financiaba por las matrículas de los estudiantes, y el Estado no hacía ninguna contribución a su

Howard Fowler, con la misión de expresar matemáticamente las teorías de física cuántica que desarrollaban Bohr, Heisenberg o Schrödinger. Este matemático, que durante la guerra había sido oficial de artillería, también acabó formando parte de su familia, al casarse con Eileen Rutherford en 1921. Junto a Fowler, otros físicos que se sintieron atraídos por los proyectos de Rutherford en Cavendish fueron Patrick Maynard Stuart Blackett, John Cockcroft, Ernest Walton y Pyotr Kapitsa.

Los años al frente del laboratorio Cavendish lo mantuvieron absorto en su labor de dirección, hecho que impactó principalmente en sus propias investigaciones. Aunque mantuvo su propio programa de investigación, Rutherford se vio obligado a dedicar buena parte de su tiempo a la administración del centro, y tam-

mantenimiento—, logró que se convirtiera en un auténtico foco de atención y que atrayera a los científicos más brillantes. Rutherford, que sucedió a Thomson en el cargo en 1919, no se vio tan asediado por la financiación gracias a que desde entonces hubo asignaciones de dinero público. Tras él, le siguió en 1938 William Bragg, con quien se desarrolló la cristalografía por rayos X, técnica fundamental que permitió fotografiar la molécula de ADN, conduciendo así a la elucidación de su estructura en doble hélice. En 1954, con el liderazgo de Nevill Mott, se desarrolló el campo de la física de la materia condensada. Ya en 1971, tomó las riendas de la institución Brian Pippard, en la que se llevó a cabo una importante ampliación de las instalaciones. Desde 1984, Sam Edward redirigió los esfuerzos del laboratorio hacia la materia condensada suave. Desde 1995, el director del laboratorio es Richard Friend, experto en la ingeniería de semiconductores basados en el carbono.



El laboratorio Cavendish, en la Universidad de Cambridge, puede verse más allá del lago.

bién a hacer frente a la avalancha de honores y premios que se le concedían por todo el mundo. Realizó constantes y largos viajes para atender las demandas de su presencia. Entre esos reconocimientos destacan sus nombramientos como presidente de la Asociación Británica para el Avance Científico (1923) y presidente de la Royal Society (1925). Tantas responsabilidades hicieron mella en su productividad científica: pasó de un ritmo endiablado de publicaciones anuales a que estas prácticamente desaparecieran.

Una de las pocas teorías científicas originales que Ernest defendió durante la década de 1920 resultó ser, además, un completo error. Creyó que el propio núcleo atómico estaba compuesto a su vez por un núcleo aún más pequeño alrededor del cual girarían otras subpartículas. Es decir, esperaba encontrar en el núcleo una reproducción a escala de la estructura del átomo, como si se tratara de una estructura como la de las muñecas rusas. Bohr cuestionó este planteamiento, y finalmente Rutherford tuvo que aceptar la evidencia de que estaba equivocado.

¿Había llegado la decadencia en una carrera, por otro lado, brillante? ¿Era el momento de que se le rindiera a Rutherford el reconocimiento merecido por sus méritos, sin esperar mayores aportaciones? Su enorme creatividad y sus constantes inquietudes le impidieron que se atuviera a esa posibilidad. Ya en 1920, con la impartición de la conferencia bakeriana, mostró que aún podía tener chispazos geniales y que su capacidad para trascender su propia época se mantenía intacta.

La celebración como segunda edición de la conferencia bakeriana apenas tuvo impacto y pasó desapercibida entre la comunidad científica. Frédéric Joliot, marido de Irène Curie, reconoció más tarde no haber acudido por considerar que se trataría del «habitual despliegue de oratoria sin ideas nuevas». Nada más lejos de la realidad y, tal como veremos a continuación, basado en lo que allí se dijo, le valió a él mismo el premio Nobel.

En esta conferencia, Rutherford fue capaz de anteceder algunos de los avances de la ciencia en los siguientes años. Entre sus pronósticos, todos ellos confirmados, hizo referencia, por ejemplo, a la existencia del hidrógeno «más pesado», que tendría un núcleo con el doble de masa del hidrógeno usual, pero que man-

tendría una estructura basada en un solo electrón. El deuterio —así se llama este isótopo del hidrógeno— fue descubierto once años más tarde. También habló en un sentido hipotético y teórico de un isótopo del helio más ligero, que también se descubrió pocos años después. Pero lo que realmente convirtió esta charla en algo especialmente visionario reside en el hecho de que se adelantara en más de una década al descubrimiento del neutrón.

CHADWICK Y EL NEUTRÓN

Con las siguientes palabras, Rutherford anticipó algunas de las características que tendría el neutrón, la partícula nuclear que nadie había sido capaz de detectar hasta ese momento:

> Es concebible que un electrón se combine mucho más próximamente con el núcleo del hidrógeno, formando un tipo de doblete neutro. Este átomo tendría propiedades noveles. Su campo externo sería prácticamente nulo, excepto en las proximidades del núcleo, y en consecuencia sería capaz de moverse libremente por la materia. Su presencia sería probablemente muy difícil de detectar por el espectroscopio, y sería imposible contenerla en un recipiente sellado. Por otro lado, sería capaz de entrar en la estructura de los átomos, y podría unirse al núcleo o ser desintegrado por su intenso campo, dando lugar en la huida a un átomo de hidrógeno cargado o un electrón o ambos.

Tal como Rutherford había indicado, al carecer de carga eléctrica, el neutrón podría penetrar más fácilmente en la estructura atómica. Rutherford lo describía como la fusión entre un protón y un electrón, lo que daría como resultado una partícula con la misma masa que el protón —la del electrón es en comparación casi nula— y con carga eléctrica neutra.

Chadwick centró parte de sus estudios y experimentos en buscar esta partícula. Lo hizo de todas las maneras posibles. «He hecho algunos experimentos absurdos», afirmó más tarde, aunque añadió: «Pero los más absurdos los hizo Rutherford». A pesar de

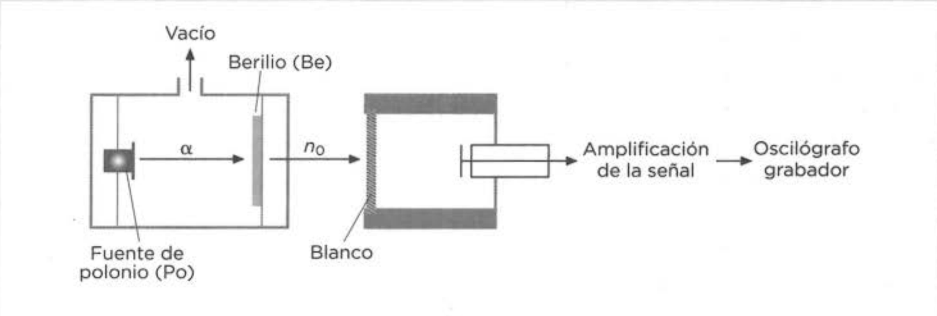
estas preliminares impresiones, su esfuerzo, después de años de trabajo, tuvo su fruto, tras conocer los experimentos realizados por un equipo de científicos alemán y otro francés.

> «Que hay que trabajar seriamente y hay que ser independiente y no solo buscar la diversión en la vida, esto nos lo dijo siempre nuestra madre, pero nunca que la ciencia fuera la única carrera que valía la pena seguir.»
>
> — Irène Curie.

En el experimento de Chadwick, el polonio se usa como fuente para generar radiación alfa. Esta radiación sirve para irradiar el berilio, de donde saltan los neutrones. Estos impactan en un blanco como el plomo, y luego un amplificador permite registrar la cantidad de los impactos.

En 1928, el equipo alemán formado por Walter Bothe y Herbert Becker usó partículas alfa procedentes de polonio y las lanzó sobre berilio. Como resultado, obtuvieron una radiación muy penetrante y de carga eléctrica neutra. Aunque sin estar seguros, los científicos alemanes se convencieron de que se trataba de radiación gamma.

Cuatro años más tarde fueron los franceses Irène, hija de Marie Curie, y su marido, Frédéric Joliot, los que se decidieron a investigar esa radiación detectada por los científicos alemanes. Se dieron cuenta de que al exponer parafina a esa radiación neutra, emergían protones. ¿Cómo era posible que la radiación gamma, que carece de masa —se trata de radiación electromagnética como la luz visible, pero más energética—, fueran capaz de expulsar protones de un elemento? Había algo que no encajaba, pero Frédéric e Irène se limitaron a señalar que podría estar relacionado con el



efecto Compton (según el cual la exposición con fotones en una superficie metálica provoca la emergencia de electrones). Energéticamente era una suposición incorrecta, dado que la masa de un protón no es comparable con la de un electrón. La radiación gamma no podía lograr el efecto observado. Algo no encajaba.

Chadwick tuvo noticias de los resultados obtenidos por los franceses y los alemanes. Tras comentárselo a Rutherford, estuvo de acuerdo en que había algún tipo de error, de modo que Chadwick se dispuso a reproducir los experimentos para hallarlo y amplió el número de objetivos a los que someter la radiación alfa: no solo usó parafina, sino también berilio (véase la figura). Los resultados comparativos —y también el hecho de darse cuenta de que la radiación emergente era capaz de penetrar en el plomo— le convencieron de que esta radiación en realidad se componía de partículas neutras tan masivas como el protón. Contaba con una ventaja sobre los científicos alemanes y franceses: su maestro había anticipado la existencia de los neutrones, y era un tema sobre el que habían mantenido numerosas discusiones. Esto le permitió identificarlos nada más verlos. Frédéric Joliot e Irène Curie, en cambio, carecían de esos antecedentes y no fueron capaces de interpretar correctamente la información (lo que les costó un premio Nobel). Por fin, el rompecabezas atómico parecía completarse. En 1932, Chadwick escribió un artículo en la revista *Nature* titulado «Posible existencia del neutrón», donde anunciaba su descubrimiento.

Para explicar el contexto de su fracaso, Frédéric Joliot arguyó que aunque el mundo científico había ignorado las ideas de Rutherford, estas seguían presentes en Cavendish, y esa ventaja fue crucial para que Chadwick fuera el primero en demostrar la manisfestación experimental del neutrón. Se diría que se trataba de una partícula especialmente escurridiza y difícil de detectar precisamente por aquello que la caracterizaba: la ausencia de carga. En palabras del propio Frédéric:

> Los viejos laboratorios con largas tradiciones siempre tienen riquezas escondidas. Ideas expresadas, en un tiempo pasado, por nuestros profesores vivos o muertos, se repiten cientos de veces, y luego se

olvidan, pero consciente o inconscientemente penetran en el pensamiento de aquellos para quienes trabajan en el viejo laboratorio y, de tanto en tanto, dan su fruto.

DEL POSITRÓN A LA FISIÓN NUCLEAR

Frédéric Joliot e Irène Curie habían desaprovechado una gran oportunidad para ganar el Nobel, y no sería la única. El físico teórico británico Paul Dirac (1902-1984) predijo la existencia del positrón en 1928. Cuatro años más tarde, en 1932, el físico estadounidense Carl Anderson descubrió, estudiando rayos cósmicos mediante una cámara de niebla, la presencia de una partícula que tenía la misma masa que el electrón, pero con una particularidad: su carga era positiva. Se trataba del antielectrón o, como acabó denominándose, del positrón, la partícula de antimateria enunciada por Dirac. Anderson fue capaz de observarla al darse cuenta de que ante un campo magnético traza una trayectoria idéntica a los electrones, al tener la misma masa, pero se desvía en dirección opuesta debido a que su carga es positiva. Su masa es la misma que la del electrón, pero sus cargas son opuestas. Los instrumentos de Joliot-Curie también habían detectado la presencia de esta extraordinaria partícula, pero de nuevo pasó desapercibido a los ojos de la pareja de científicos. Consideraron entonces que los positrones podían ser un interesante campo de estudio. De nuevo se sirvieron de polonio como fuente de partículas alfa, y se dedicaron a bombardear una lámina de aluminio. En cierto momento de este proceso se emitían positrones, pero lo que llamó su atención es que, al dejar de emitir radiación alfa, el aluminio —que con el impacto se había transformado en fósforo— seguía emitiendo radiación. Comprobaron una y otra vez que todos los instrumentos funcionaran correctamente. Es decir, habían logrado transformar de forma artificial un material estable como el aluminio en otro radiactivo. Como resultado de sus observaciones, también pudieron llegar a la conclusión de que la desintegración que da lugar a la radiactividad podía producir tanto electrones como positrones (desintegraciones β^+ y β^-). En

FIG. 1

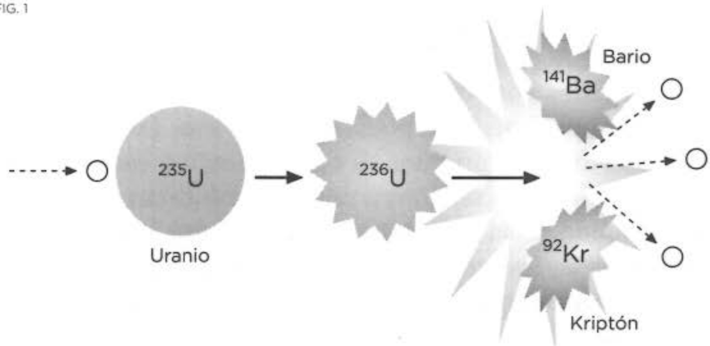


FIG. 2

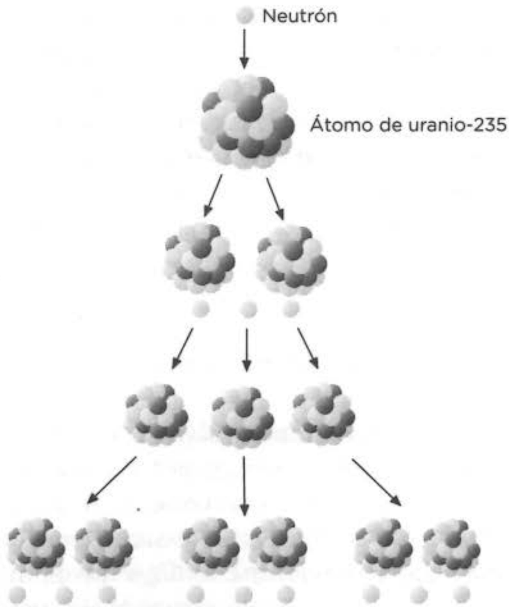


FIGURA 1:
En el proceso de fisión del núcleo del uranio, se bombardea el uranio con neutrones. El núcleo se divide en dos partes casi iguales, dando lugar a un átomo de bario (Ba) y kriptón (Kr).

FIGURA 2:
Cuando se fisiona uranio con un neutrón, además de partirse en dos el átomo de uranio, emergen otros tres neutrones, que a su vez pueden provocar la escisión de otros tres núcleos atómicos. En pocos instantes, esta reacción en cadena puede liberar una energía extraordinaria; es la base de la bomba atómica.

esta ocasión sí que fueron merecedores de la recompensa del premio Nobel de Química, en 1935.

El descubrimiento de Chadwick, por otro lado, condujo al desarrollo de la fisión nuclear, donde los neutrones tienen un papel crucial. Otto Hahn y Lise Meitner, ambos colaboradores de

Rutherford, fueron los primeros en llevar a cabo este proceso. La fisión nuclear se basa en el bombardeo con neutrones de materiales como el uranio, elemento escogido porque era uno de los más grandes conocidos en la época. Tal como Rutherford había predicho, el neutrón podía penetrar más fácilmente en el núcleo, y su impacto produce su rompimiento o escisión en dos del núcleo original. Esto libera una gran cantidad de energía, y como resultado de la reacción se obtienen dos nuevos átomos, de menos masa, en sustitución del uranio original: el bario y el kriptón (figura 1, en la página anterior). Esto supuso una gran sorpresa para Hahn, dado que ambos son elementos muy ligeros en comparación con el uranio. En realidad, en un principio, cuando Hahn detectó el bario, ignoraba de dónde había surgido. Pero en discusiones con Meitner pudieron determinar que el origen estaba en el bombardeo del uranio con neutrones.

Otro de los productos del proceso de la fisión nuclear son neutrones, que pueden aprovecharse para escindir a su vez otros tantos núcleos de uranio atómico. De esta manera, se puede provocar una reacción en cadena de desintegración nuclear (figura 2).

EL ACELERADOR DE PARTÍCULAS

Kapitsa, Walton y Cockcroft son algunos de los nombres relacionados con la construcción del primer acelerador de partículas. Gracias a este instrumento científico se inició la llamada época de la Gran Ciencia, tanto en lo referente a instalaciones y financiación, como a la colaboración y coordinación de numerosos equipos de científicos. El propio Rutherford lo aseguró en 1927 en un discurso a la Royal Society: «El futuro pertenece a la Gran Ciencia». También afirmó que conseguir «electrones a gran velocidad y átomos a gran velocidad abriría un campo extraordinariamente interesante de investigación».

El acelerador se había tornado una necesidad. Rutherford —que había sido un genio manejando partículas alfa de origen natural para desentrañar los misterios del átomo— reconocía que

este método de investigar las partículas fundamentales de la materia había alcanzado sus límites. Si se quería alcanzar un conocimiento más profundo era necesario aplicar mayor energía a las partículas de forma artificial.

GENERADORES

El secreto estaba en generar la suficiente energía como para descomponer los núcleos de los átomos. Aunque los primeros cálculos apuntaban a que la cantidad de energía necesaria para romper un átomo era inalcanzable, hubo pioneros que no se echaron por ello atrás. Uno de ellos fue Pyotr Kapitsa, de origen ruso, que tras una visita a Cavendish, en 1921, decidió permanecer al lado de Rutherford, durante quince años.

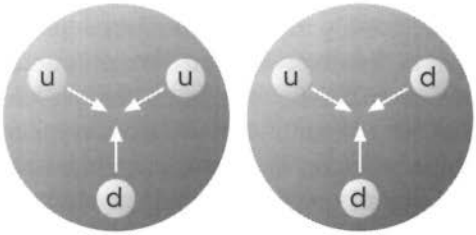
> «Es un físico absolutamente excepcional y un hombre muy original.»
>
> — Palabras de Pyotr Kapitsa en muestra de la enorme admiración que tenía por su maestro Rutherford.

Kapitsa era muy dinámico y tenía una gran capacidad de persuasión, lo que le permitió que Rutherford destinara para sus proyectos más dinero que para la suma del resto. Este hecho generó más de un encontronazo debido al trato diferencial que recibían los miembros del equipo. También instauró unas reuniones informales junto a otros científicos para comunicar sus ideas. En el club Kapitsa se respiraba un ambiente distendido y, por ejemplo, fue el lugar que escogió Chadwick para anunciar el descubrimiento del neutrón. Kapitsa congenió siempre a la perfección con Rutherford, y era uno de los pocos que se atrevían a bromear en su presencia y a cuestionar sus ideas. Ambos compartían además una misma concepción de la ciencia y del vínculo entre teoría y práctica. Para Kapitsa, «la separación de la teoría de la práctica, del trabajo experimental, y de la práctica sobre todo, perjudica principalmente a la propia teoría». Kapitsa tenía muy claro que para investigar la materia era necesario desarrollar in-

tensos campos magnéticos, para lo cual se requerían potentes dinamos. Gracias a los campos magnéticos generados se podría modificar la trayectoria de todo tipo de partículas con carga eléctrica. Fue capaz de crear los campos magnéticos potentes de la

UN REPERTORIO DE PARTÍCULAS

Cuando en 1932 Chadwick, colaborador de Rutherfod, descubrió el neutrón, parecía que la última pieza del puzle atómico había sido descubierta. Se trataba de una partícula que se sumaba al descubrimiento del electrón, realizado por Thomson, y luego del protón, por parte de Rutherford. Parecía que se había logrado describir los componentes más elementales de la materia. Sin embargo, con el desarrollo de los aceleradores de partículas, en la década de 1950 empezó a tomar cuerpo la idea de que las partículas nucleares —protones y neutrones— tenían algún tipo de estructura en su interior. Esto significaba que probablemente existían otras partículas aún más fundamentales tras las partículas del núcleo. En 1964, el físico estadounidense Murray Gell-Mann introdujo la idea del quark como respuesta a los resultados experimentales. Sucesivos descubrimientos permitieron concluir que existen seis tipos (también llamados «sabores») de quarks: *up* (u), *down* (d), *charm* (c), *strange* (s), *top* (t) y *bottom* (b). Según Gell-Mann, cuando los quarks se presentan unidos en una tríada generan protones y neutrones (lo que se conoce también como «materia bariónica»). Por ejemplo, la combinación de dos quarks *up* y un quark *down* da lugar a un protón; y un quark *up* y dos quarks *down* producen un neutrón (figura siguiente).



Protón Neutrón

Más descubrimientos

Los quarks, en todo caso, no serían las únicas partículas elementales que iban a descubrirse. En 1937, el estudio de la radiación cósmica permitió detectar una nueva partícula a la que se llamó *partícula mu* o *muón*. Como el electrón, tiene

época, solo superados varias décadas más tarde. Los estudios de Kapitsa sobre campos magnéticos fueron aprovechados posteriormente por Walton y Cockcroft para construir su acelerador de partículas.

carga negativa, pero es 200 veces más pesada. En 1975, a esta partícula habría que añadir la partícula tau, también negativa, pero esta vez 3500 veces más pesada que el electrón. Los electrones, los muones y la partícula tau pasaron a llamarse *leptones*. En este grupo también se incluyen tres tipos de neutrinos, que son la contrapartida simétrica de cada una de las tres partículas anteriores: el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico. Además de estas partículas, los físicos también han señalado la existencia de partículas que intervienen cuando las partículas anteriores interaccionan entre sí. La más conocida es el *fotón*, a la que hay que sumar el *gluón*, que surge en las interacciones fuertes y que explica por qué las partículas del núcleo se encuentran fuertemente sujetas entre sí superando las fuerzas electrostáticas de repulsión. A estas partículas que actúan como intermediarias se las conoce también como *bosones*, y entre ellas hay que añadir los bosones W y Z, que actúan en las interacciones débiles (en el recuadro se muestran estas «nuevas» partículas elementales). Cuando Rutherford y Thomson descorrieron las cortinas que escondían las partículas elementales del átomo, nadie podía imaginar que un hervidero de partículas en constante ebullición iba a hacer acto de presencia.

	Quarks		Bosones intermediarios
up u	*charm* c	*top* t	fotón γ
down d	*strange* s	*bottom* b	gluones g
	Leptones		
electrón e	muón μ	tau τ	fuerza débil $W^{\pm}$
neutrino del electrón ν_e	neutrino del muón ν_μ	neutrino del tau ν_τ	fuerza débil Z^0

PYOTR KAPITSA



Pyotr Leonidovich Kapitsa (1894-1984) nació en la localidad rusa de Kronstadt, de padre militar y madre maestra. Estudió ingeniería en la Universidad de Petrogrado (actual San Petersburgo) y vivió la Revolución rusa. Su esposa y sus dos hijos fallecieron en 1918 a causa de la terrible pandemia de gripe que ese año asoló el mundo. Kapitsa se incorporó como profesor de la universidad en 1919. Dos años más tarde, formó parte de una comitiva universitaria que viajó por toda Europa para adquirir materiales y compartir ideas con otros científicos. Al recalar en Cavendish, Kapitsa pudo establecerse junto a Rutherford. Se doctoró en Cambridge en 1923 y fue nombrado director asistente de la investigación magnética de Cavendish. En 1929, fue nombrado miembro de la Royal Society. Kapitsa siempre mantuvo su nacionalidad y también contactos con la Unión Soviética, y compaginó una exitosa carrera profesional con constantes viajes a su país. Para trabajar junto a él, Rutherford solo le impuso una condición: tenía prohibido hablar de política en el laboratorio. Kapitsa convenció a Rutherford para construir un laboratorio donde poder realizar sus investigaciones. Rutherford accedió a invertir parte del presupuesto de la Royal Society en esa construcción y en 1932 se inició la edificación del laboratorio Mond de la Royal Society, en uno de cuyos muros

COCKCROFT Y WALTON

El físico británico John Douglas Cockcroft (1897-1967), asistente de Kapitsa en el laboratorio Mond, tenía formación matemática y había trabajado también en la industria eléctrica, una experiencia que cuando empezó a trabajar en el laboratorio Cavendish se reveló como fundamental. Por su parte, el físico irlandés Ernest Thomas Sinton Walton (1903-1995) se había especializado en hidrodinámica. Se sintió totalmente fascinado por las investigaciones realizadas por Rutherford, a pesar de que carecía de la experiencia y los

Kapitsa hizo esculpir la figura de un cocodrilo, en homenaje al maestro que había hecho realidad esa fulgurante carrera científica. De hecho, fue el propio Kapitsa quien acuñó ese mote refiriéndose cariñosamente a Rutherford. En el nuevo laboratorio construyó el primer licuador de helio, estudio que en 1978 le reportó el premio Nobel de Física por sus descubrimientos en magnetismo, en el helio líquido y en la física a bajas temperaturas.

El régimen de Stalin

En 1934, por orden del propio Stalin, las autoridades soviéticas impidieron a Kapitsa salir del país, y le instaron a que a partir de ese momento desarrollara su carrera científica en su patria. Rutherford hizo campaña para que lo dejaran regresar, pero las autoridades soviéticas le respondieron de forma contundente: «A Cambridge le gustaría sin duda tener a los más grandes científicos del mundo en sus laboratorios tanto como a la Unión Soviética le gustaría disponer de lord Rutherford». Kapitsa fue nombrado director del Instituto de Problemas de Física de Moscú, donde trasladó todo el equipo que había adquirido para el laboratorio de Cambridge (una transacción que incluía en realidad todo el edificio, aunque en Cambridge reconstruyeron una copia). En 1938, descubrió el estado de la materia conocido como superfluidez, al observar que había una forma de helio que carecía de viscosidad. También inventó un dispositivo para la producción industrial de oxígeno líquido. Kapitsa logró entablar amistad con Stalin, lo cual le garantizó que su laboratorio contara con algunos privilegios. Trabajó junto a Lev Landau, físico soviético capaz de explicar la superfluidez recurriendo a la teoría cuántica. Sin embargo, cuando en 1945 rechazó participar en el proyecto de construcción de una bomba atómica soviética, Kapitsa fue apartado de sus cargos. Solo tras la muerte del dictador, en 1953, logró recuperar su posición al frente del Instituto de Problemas de Física. Kapitsa murió en Moscú en 1984.

conocimientos necesarios sobre la estructura atómica. También estaba convencido de que el acelerador de partículas iba a ser uno de los grandes proyectos de la época, y quería participar en él. En 1927, pudo mostrar a Rutherford uno de sus trabajos relacionados con cilindros y corrientes de agua realizado gracias a la beca de la Exposición de 1851 (la misma que había ganado Rutherford). El Profesor se convenció de que podía ser un buen fichaje.

Rutherford, Cockcroft y Walton iniciaron con esto una colaboración que se prolongó durante cinco años y que tenía como propósito dividir el átomo de forma artificial mediante un acele-

rador de partículas (véase el anexo B). Primero trabajaron junto a Kapitsa para lograr acelerar electrones aplicando voltajes muy intensos. En un principio, creyeron que era necesario aplicar millones de voltios para obtener los resultados deseados —tarea que parecía fuera de su alcance—, pero Cockcroft leyó un trabajo del físico y astrónomo ucraniano George Gamow (1904-1968) en el que se aseguraba que con voltajes bastante inferiores al millón de voltios se podía conseguir el mismo objetivo. Gamow llegaba a la conclusión de que si se tienen en cuenta fenómenos cuánticos, partículas que *a priori* no disponen de la suficiente energía para alcanzar el núcleo según las leyes de la física convencionales, en realidad sí logran su objetivo gracias al llamado «efecto túnel». La meta de alcanzar su propósito era viable.

Walton y Cockcroft se pusieron manos a la obra y las primeras piezas de lo que sería el acelerador de partículas, que se ensamblaban en los sótanos de Canvendish, empezaron a llegar en 1928. Se inició en esos momentos una dura competencia entre laboratorios de distintas partes del mundo.

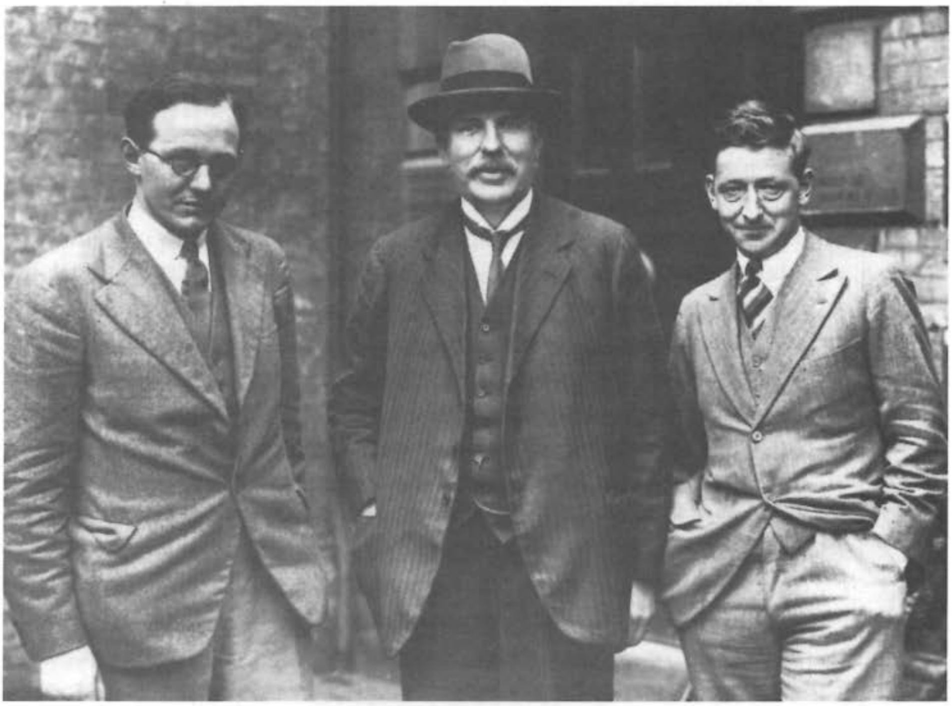
A principios de 1930, había por lo menos cinco participantes en esta sorprendente carrera que buscaba acelerar partículas con la intención de interrogar el núcleo atómico. En Estados Unidos, por ejemplo, había varios proyectos, como el dirigido por Ernest Lawrence en la Universidad de California, donde se inició la construcción de un acelerador circular que posteriormente se denominó *ciclotrón*. En Carnegie, Merle Tuve estaba construyendo un acelerador tan grande que no cabía en ningún edificio, por lo que se vio obligado a construirlo a la intemperie, con el problema añadido de que los aparatos se estropeaban constantemente.

Con los grandes voltajes se pretendía crear intensos campos electromagnéticos, que a su vez contribuirían a empujar las partículas que entraran en su campo de acción. Estas partículas se dirigirían hacia un blanco fijo, como una fina lámina de metal. En el proyecto de Cockcroft y Walton —bajo la supervisión de Rutherford— se buscaba la aceleración de protones para hacerlos colisionar con láminas de litio (que es el más ligero de los metales). Cuando la partícula acelerada golpeara contra los átomos, su intensa velocidad permitiría suponer que algunos de sus



FOTO SUPERIOR:
Irène Curie y su marido Frédéric Joliot en su laboratorio en 1935, año en el que ambos recibieron el premio Nobel de Química por sus trabajos en la síntesis de nuevos elementos radiactivos.

FOTO INFERIOR:
Ernest Rutherford (centro), Ernest Walton (a su derecha) y John Cockcroft trabajaron juntos en el laboratorio Cavendish en la tarea de dividir el átomo de forma artificial con aceleradores de partículas.



núcleos recibiría su impacto. ¿Se lograría descomponer el núcleo, tal como ya había observado Rutherford en 1917? En realidad, nadie sabía las implicaciones si el experimento acababa por tener éxito, aunque existía la convicción de que abriría las puertas a una comprensión más profunda de la naturaleza.

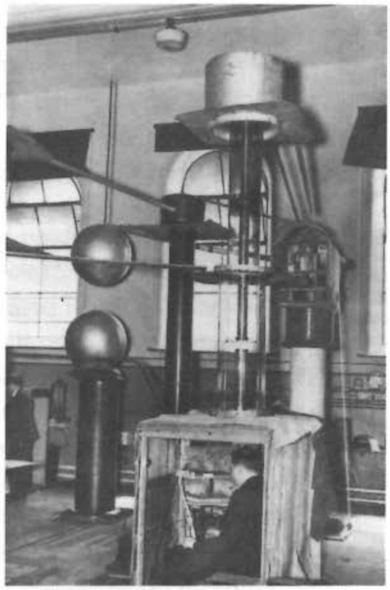
En medio de esta carrera tan intensa y emocionante, Rutherford sufrió uno de los golpes más impactantes de su vida. En 1930 falleció su hija Eileen, cuando estaba dando a luz a su cuarto hijo. Ernest no pudo superar jamás ese dramático acontecimiento. Envejeció rápidamente, y se volcó en cuidar a sus nietos. Sus viajes al extranjero se pospusieron o anularon. El laboratorio y su intensidad intelectual siguieron atrayéndolo, pero en menor medida. Pocas semanas después de la muerte de su hija, fue nombrado barón con el título de «lord Rutherford de Nelson». En su escudo de armas escogió la figura de un guerrero maorí y de un ave, el kiwi, en reconocimiento a su lugar de origen. Entre otras referencias, escogió una imagen de Hermes Trismegisto, personaje mítico griego considerado como el primer alquímico. También había un lema en latín: «*primordia quaerere rerum*», es decir, «investigar en el fundamento de las cosas».

Mientras tanto, Cockcroft y Walton pronto se dieron cuenta de que necesitaban crear una diferencia de potencial mayor del que habían calculado en un principio. Sus competidores lograban crear voltajes de más de un millón de voltios, por lo que a todas luces parecía que estaban en desventaja. Sin embargo, aún nadie había logrado romper un núcleo atómico, así que seguían albergando esperanzas. Rutherford, por su parte, continuaba exigiendo resultados urgentemente, tal como había hecho siempre. Además, sospechaba que sus alumnos estaban retrasando premeditadamente el inicio de las pruebas por cierto temor a fracasar.

En 1930, el ciclotrón estaba en funcionamiento con unos voltajes de 1,2 millones de voltios. No obstante, no había conseguido escindir ningún átomo. El aparato de Walton y Cockcroft, por su parte, consistía en una torre de unos 4,5 m de alto y con un generador que a duras penas cabía en el sótano. En 1932 afirmaron haber logrado unos voltajes de ochocientos mil voltios, que era la cantidad que habían calculado que se requería para romper el átomo.

EL GENERADOR COCKCROFT-WALTON

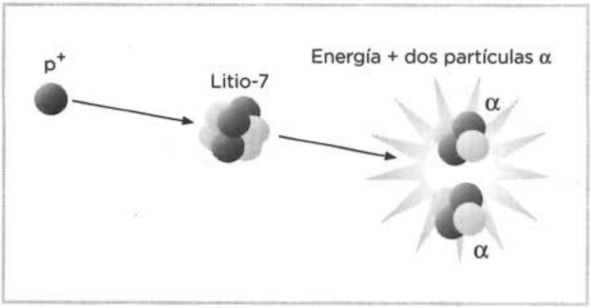
El trabajo de Cockcroft y Walton consistió principalmente en construir un generador de grandes dimensiones, es decir, un circuito eléctrico capaz de crear grandes voltajes de corriente continua a partir de bajos voltajes de corriente alterna. Con este generador fueron capaces de acelerar las partículas a la velocidad suficiente como para desintegrar el átomo por primera vez en la historia. Su generador estaba compuesto por una red en forma de escalera de capacitores y diodos capaz de multiplicar el voltaje. Se trataba de un sistema muy efectivo y más económico que el uso de transformadores.



Ernest Walton ajustando el funcionamiento del generador Cockcroft-Walton hacia 1940, con el detector desde el cual se podían realizar las observaciones de los centelleos tras la desintegración del litio.

Cuando el 14 de abril de 1932 Walton puso en funcionamiento el acelerador, no había nadie más presente que fuera testigo de aquellos primeros tintineos que empezó a captar la máquina. Walton era consciente de que estaba ocurriendo algo importante, por lo que de inmediato avisó a Cockcroft y a Rutherford para que echaran un vistazo a estos resultados. Rutherford se puso enseguida a comprobar la naturaleza de los centelleos y los reconoció inmediatamente como partículas alfa, viejas conocidas que de nuevo volvían a hacer acto de presencia. En ese momento, Rutherford aseguró:

> Estos centelleos se parecen poderosamente a partículas alfa. Y yo precisamente debería ser capaz de identificar el centelleo de una partícula alfa solo con verla, porque estuve en su mismísimo nacimiento.



El protón acelerado impacta contra el núcleo de litio, produciendo energía y escindiéndolo al mismo tiempo en dos partes iguales identificadas como partículas alfa.

Las partículas alfa eran en realidad fragmentos de litio, que se había escindido en dos mitades. Efectivamente, la máquina estaba captando partículas alfa que, como ya se ha dicho, están compuestas por dos protones y dos neutrones. Con su acelerador de partículas habían lanzado un protón contra un isótopo del litio compuesto por 3 protones y 4 neutrones en su núcleo. Al impactar con el litio, el protón primero era absorbido por el núcleo —formando un núcleo inestable de 4 protones y 4 neutrones— y luego se desencadenaba un proceso de desintegración del átomo en dos mitades iguales (véase la figura). La división era exacta, de modo que surgían dos partículas, cada una con dos protones y dos neutrones. Eran las partículas alfa que estaba registrando el detector. Habían logrado escindir el núcleo atómico por la mitad.

Rutherford instó a que inmediatamente los dos investigadores escribieran el artículo científico confirmando el descubrimiento. Eran los primeros en lograr el ansiado objetivo, y nadie se les podía adelantar en el último momento. Dos semanas después, la revista *Nature* anunciaba el descubrimiento con un texto de Cockcroft y Walton, en el que afirmaban:

> El brillo de los centelleos y la densidad de las pistas observadas en la cámara de expansión sugieren que las partículas captadas son partículas alfa comunes. Si este punto de vista resulta ser correcto, es probable que el isótopo de litio de masa 7 de vez en cuando capte un protón y el núcleo resultante de masa 8 se rompa en dos partículas alfa, cada una de masa 4 y cada una con una energía de cerca de ocho millones de electronvoltios. La evolución de la energía en este punto de vista es aproximadamente de dieciséis millones de electronvoltios por desintegración, coincidiendo aproximadamente con la que se espera a partir de la disminución de la masa atómica implicada en tal desintegración.

Casualmente, Einstein tenía programada una visita al laboratorio pocas semanas más tarde. El físico alemán tuvo ocasión entonces de conocer a Cockcroft y Walton y también de visitar las instalaciones. Precisamente, en las reacciones nucleares era necesario recurrir a su fórmula $E = mc^2$ para explicar que una parte de la masa implicada al principio del proceso se convertía en energía.

Después de años sin poder anunciar ninguna contribución especialmente relevante, Rutherford había logrado de nuevo ocupar la posición más destacada. En el mismo año, Chadwick también pudo anunciar el descubrimiento del neutrón. Se trataba de hitos científicos asociados para siempre al gran profesor.

EL FINAL DE UNA ÉPOCA

Rutherford se había mantenido en las primeras filas de la innovación científica durante tres décadas, y aún seguía resistiéndose a ceder el centro de la investigación puntera. Ya había superado los sesenta años, y todavía había tenido la energía y el entusiasmo suficientes como para embarcarse en el estudio del deuterio, el hidrógeno pesado que profetizó y que solo recientemente había sido descubierto. Seguía en continuo contacto por carta con los científicos más destacados, entre los que se contaban las nuevas generaciones. Una de las ideas que defendió con ahínco —precisamente en una época de gran convulsión social y política— es que las ideas científicas necesitaban ser difundidas, comunicadas y transmitidas. El discurso científico, por su propia naturaleza, era opuesto a la cerrazón propia de los patrioterismos. Su raíz era puramente cosmopolita.

En 1933, Rutherford participó en una controversia científica referida a los posibles usos de la cuantiosa energía liberada de la fisión de los núcleos atómicos. Era muy crítico con sus posibles usos comerciales, porque para romper el átomo había sido necesario emplear unas cantidades asombrosas de energía para acelerar las partículas. Según su punto de vista, este proceso jamás alcanzaría la eficiencia. Tuvo que matizar esta opinión tres años

más tarde, al darse cuenta de que los neutrones no requerirían tanta energía para decomponer el núcleo y desatar la energía almacenada en su interior. «Solo bastaba con que apareciera un método que permitiera producir neutrones lentos en cantidad suficiente y sin que fuera necesario gastar más energía.» Sin embargo, hasta el momento no se conocía nada parecido.

EL NAZISMO Y LA CIENCIA

Rutherford entendía que la colaboración era una de las piezas fundamentales del progreso científico, y a pesar de que jamás exponía sus ideas políticas, cuando Adolf Hitler alcanzó el poder en Alemania en 1933, pudo darse cuenta de que esta tendencia política suponía una verdadera amenaza para todos sus ideales científicos.

«Estas transformaciones de los átomos son de un interés extraordinario para los científicos, pero no podemos controlar la energía atómica hasta el punto que pudiera ser valiosa comercialmente, y creo que no estamos ni por asomo cerca de lograrlo.»

— Ernest Rutherford.

En Alemania empezaron a promulgarse leyes con la finalidad de expulsar a los judíos de órganos de poder y de las instituciones. Las universidades no fueron una excepción, de modo que numerosos colegas de Rutherford fueron expulsados de la universidad y de los centros de investigación. Uno de los colectivos científicos más brillantes quedó a la intemperie y expuesto a sufrir toda clase de penurias.

El nazismo no solo persiguió a los científicos judíos, sino que también trató de hacer desaparecer sus ideas científicas realizadas. Apostaban por arrinconar la llamada «física judía», en la que destacaba la relatividad de Albert Einstein, para defender una física aria. Los propulsores de estas ideas, entre los que se encontraban

Johannes Stark (1874-1957) y Philipp Lenard (1862-1947), animaron a destruir los libros de estos autores y a quemarlos en público.

Rutherford se implicó personalmente en ayudar al colectivo —por ejemplo, hizo las gestiones necesarias para que Born fuera acogido en la Universidad de Edimburgo— y también dirigió el Consejo de Asistencia Académica, un organismo que actuaba como red asistencial y que aspiraba a ayudar a esos científicos a encontrar acogida en universidades del extranjero.

En una época de fuerte crisis económica y en la que el antisemitismo estaba muy extendido, Ernest Rutherford se tuvo que enfrentar a numerosas dificultades y a la incomprensión de sus conciudadanos. El Consejo tuvo que atender 1300 peticiones de ayuda.

LA MUERTE DEL GENIO

Rutherford no dejó en ningún momento de impartir conferencias y ocuparse de sus nietos. La tensión en la que acostumbraba a mantener al grupo de estudiantes e investigadores del laboratorio Cavendish —que tan buenos réditos había proporcionado en el pasado— fue disminuyendo, lo que tuvo una dolorosa contrapartida: sus colaboradores más próximos fueron alejándose de él. Walton, tras su inmenso éxito con el acelerador de partículas, acabó por aceptar una cátedra en el Trinity College. También Chadwick, que en 1935 recibiría el Nobel de Física, decidió partir hacia la Universidad de Liverpool, cansado de que Rutherford pusiera dificultades para la construcción de un ciclotrón. Otro caso fue el del físico de origen australiano Mark Oliphant (1901-2000), que desde 1927 formaba parte del laboratorio y que había colaborado en lograr la desintegración artificial del núcleo atómico. En 1937, a Oliphant le ofrecieron dirigir su propio laboratorio en Birmingham. Al conocer su marcha, Rutherford no pudo más que afirmar: «Estoy rodeado de colegas desagradecidos». A pesar de la decepción que supusieron para él estos abandonos, en todo momento Ernest siguió apoyando a «sus muchachos» —tal como los llamaba—, los recomendó para conseguir sus puestos y se ofreció a ayudarlos siempre que fuera necesario.

En 1937, Rutherford sufrió una caída mientras estaba podando un árbol de su jardín. Al dolor se le sumó un malestar que le hacía vomitar constantemente. Se trataba de una hernia que con la caída había empeorado. Su mujer recurrió primero a tratamientos naturistas, pero al final optó por llamar a un cirujano, que se vio obligado a realizar una operación trivial para la época. Aunque la operación pareció ir bien, su estado decayó. La muerte era inminente, por lo que con su esposa escribieron rápidamente algunas cartas de despedida, una de ellas dirigida a Chadwick. El 19 de octubre de 1937, Ernest Rutherford falleció.

Uno de sus estudiantes se refirió una vez a Rutherford como «una fuerza de la naturaleza». Así se mantuvo hasta poco antes de morir. Su muerte causó una gran conmoción entre los colegas, colaboradores y admiradores que había tenido a lo largo de su vida. «El Profesor ha muerto»: la voz corrió por todas las instituciones científicas del mundo, y nadie tenía dudas sobre a quién se referían. Bohr, que estaba en un congreso científico cuando le llegó un telegrama de la mujer de Rutherford, no pudo evitar llorar cuando comunicó al resto de los asistentes y colegas este trágico desenlace. Periódicos como el *The New York Times*, que habían recogido buena parte de sus proezas y éxitos, también dejaron constancia de su fallecimiento:

> A muy pocos hombres se les ha otorgado el honor de alcanzar la inmortalidad, y aún menos el de alcanzar el rango del Olimpo mientras aún estaban con vida. Lord Rutherford consiguió ambas cosas. En una generación que ha sido testigo de una de las revoluciones más grandes en toda la historia de la ciencia, fue universalmente reconocido como quien lideró la exploración del vasto e infinitamente complejo universo que hay dentro del átomo.

Sus cenizas se enterraron en la abadía de Westminster, cerca de la tumba de Newton. Años más tarde, como homenaje, el rutherfordio (Rf) pasó a ocupar el lugar 104 en la tabla periódica: elemento sintético altamente radiactivo y generado por primera vez en 1964, fue bautizado en su honor.

Anexo A

DESINTEGRACIÓN ALFA Y BETA

La desintegración radiactiva se produce para determinados elementos debido a que la combinación de protones y neutrones formando el núcleo, unidos por la llamada interacción nuclear fuerte, tiene un carácter energéticamente inestable. La mayoría de los elementos con más de 81 protones son radiactivos; es decir, la radiactividad se da principalmente en átomos pesados, aunque también los elementos más ligeros, por ejemplo el carbono, tienen isótopos radiactivos, como es el caso del carbono-14. La radiactividad se constata porque dichos elementos expulsan partículas subatómicas de forma espontánea sin ser ello la respuesta a un estímulo externo.

Para trazar la sucesión de transformaciones que se producen en el interior del núcleo de un átomo en la desintegración radiactiva, físicos y químicos emplean dos números: el número atómico y el número másico. El número atómico se representa con la letra Z e indica el número de protones que constituyen el núcleo. Cada elemento químico se caracteriza precisamente por Z, número que es específico y exclusivo, por ejemplo, 6 para el carbono o 14 para el silicio. El número total de partículas que hay en dicho núcleo, que incluye, por tanto, a los protones y a los neutrones, se indica con el número másico, simbolizado con la letra *A*. En resumen:

Z = número de protones
A = número de protones más neutrones (número total de partículas constituyentes del núcleo)
A – Z = número de neutrones.

Tal como descubrió Rutherford, existe un tipo de radiación llamado *alfa*, y otro tipo al que se denominó *beta*. Las partículas α son núcleos de helio (es decir, formados por dos protones y dos neutrones). Cuando un elemento emite una partícula alfa, significa que pierde dos protones, lo cual implica que el elemento es ahora distinto, de menor número atómico (–2), una transmutación del elemento. Por ejemplo, el uranio, que posee 92 protones, cuando emite una partícula alfa se convierte en torio, con 90 protones.

La desintegración beta (β) es un fenómeno físico intrínsecamente más complejo, y ocurre cuando un neutrón se convierte en un protón o viceversa. En este intercambio se generan nuevas partículas. La desintegración beta evidencia que las partículas fundamentales, «aunque tienen propiedades bien definidas, no son estructuras permanentes y una de ellas puede transformarse en otras varias».

La desintegración beta puede clasificarse en dos tipos por sus respectivos mecanismos de desintegración: desintegración β^- y desintegración β^+. En la desintegración β^- se emite un electrón que surge propiamente del núcleo atómico y no debido a la ionización de uno de los electrones constituyentes de la nube electrónica que envuelve el núcleo. Uno de los neutrones del núcleo *(n)* se escinde, dando lugar a dos partículas: un protón (p^+), que permanece en el núcleo, y la emisión de un electrón (e^-). En este proceso también se genera un antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$); se puede simbolizar así:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Al variar el número de protones (+1), varía en número atómico y, por tanto, se convierte en un elemento químico distinto. En cambio, el número másico permanece inalterado (el átomo pierde un neutrón, pero gana un protón). Por ejemplo, esto es lo que ocurre con el isótopo del torio $^{234}_{90}\mathrm{Th}$. Tras una desintegración beta en la que emite un electrón, el átomo se convierte en un isótopo del protactinio que se representa por $^{234}_{91}\mathrm{Pa}$.

La segunda forma de desintegración beta se representa por β^+, y da lugar a un positrón (e^+), que es una antipartícula, un partícula con la misma masa que el electrón, pero con carga positiva. En ese caso, en el núcleo se pierde un protón, dando lugar a un neutrón, un positrón y un neutrino electrónico. Esto significa que de nuevo el número de partículas del núcleo permanece inalterado (en lugar de un protón se obtiene un neutrón) y el elemento se transmuta esta vez, perdiendo un protón —cambia su identidad química—. Es el caso del nitrógeno $^{13}_{7}N$, que en la emisión de un positrón se convierte en un isótopo de carbono representado por $^{13}_{6}C$. La desintegración β^+ se representa de la siguiente manera:

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e.$$

LA RADIACIÓN GAMMA

La emisión de radiación gamma difiere de los procesos de desintegracion alfa y beta en que en lugar de partículas emite radiación electromagnética, fotones muy energéticos. Se produce en muchas fases de los procesos radiactivos por causas diversas, como por ejemplo cuando una partícula del núcleo pasa de un estado excitado a su estado fundamental. En este fenómeno no se producen variaciones en los constituyentes del núcleo (ni del átomo). Sin embargo, debido a su altísima energía, la radiación generada es la más penetrante y dañina, capaz de interaccionar con las células y producirles alteraciones por interacción con la cadena de ADN.

EL PODER DE PENETRACIÓN

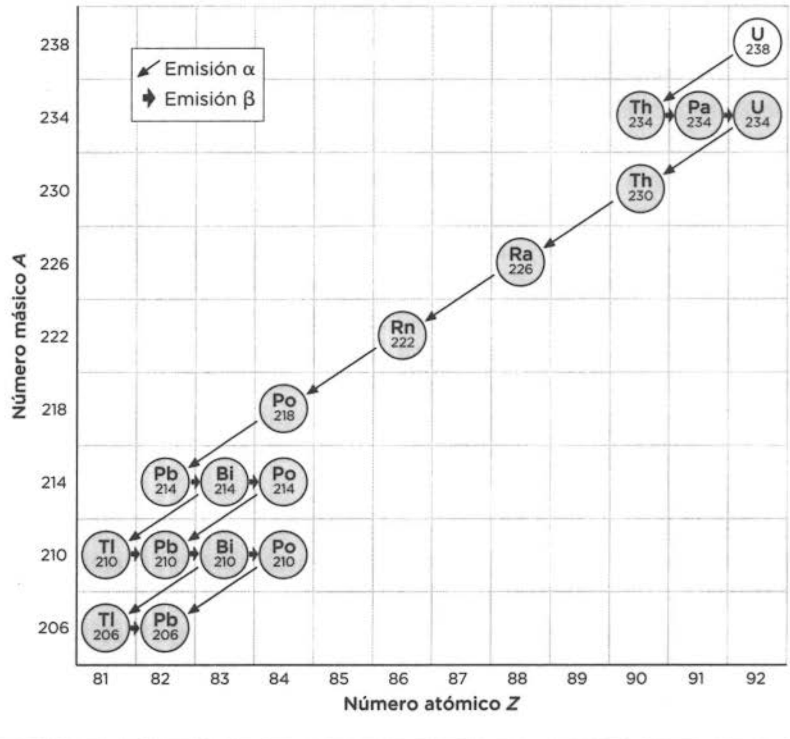
Características de las radiaciones alfa, beta y gamma son sus diferencias en cuanto a poder de penetración e ionización. Como la radiación beta está constituida por electrones o por positrones, de masa mucho menor que la partícula alfa, para una energía dada pueden adquirir más momento. La radiación alfa, en cambio, al estar formada por dos protones y dos neutrones, es absorbida con mayor facilidad por la materia. La masa de un protón o un

neutrón es casi dos mil veces la masa del electrón, de modo que la probabilidad de colisión y magnitud de la interacción es significativamente mayor, lo que explica que el poder de penetración de los rayos alfa sea mucho menor. La radiación gamma, en cambio, no es propiamente una partícula masiva, sino que se trata de una onda electromagnética, semejante a la luz visible, pero mucho más energética.

El gráfico representa la tendencia en cuanto a variación de los números atómico y másico, resultado de los procesos de desintegración alfa y beta. Al final de la secuencia de desintegración se encuentra el plomo (Pb), en su isótopo no radiactivo.

LAS SERIES RADIACTIVAS

Las desintegraciones radiactivas producen en general elementos que a su vez son radiactivos, de modo que dan lugar a nuevas de-



sintegraciones. En último término, de estas cadenas radiactivas se acaba formando un elemento que es estable, de modo que queda cerrado el ciclo de transformaciones. En la naturaleza se conocen tres series radiactivas: la serie del uranio (véase la figura), la del actinio y la del torio.

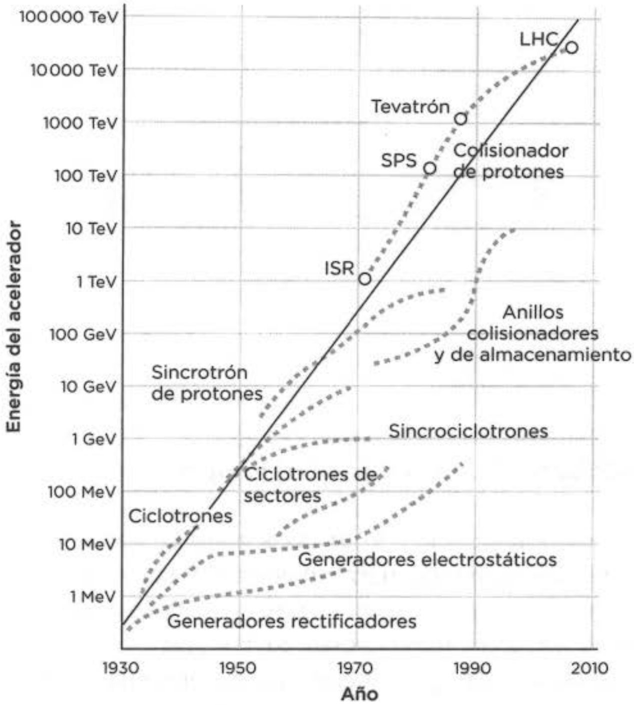
Anexo B

LOS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Gracias a unas instalaciones llamadas *aceleradores de partículas*, se puede hacer impactar partículas elementales como protones o electrones contra otras partículas o contra átomos en condiciones de extremo vacío y altísimas energías. El estudio de las partículas resultantes y el análisis de las energías implicadas en las colisiones proporciona valiosa información para conocer la intimísima estructura de la materia. Además constituye una fuente de radiación («luz») que posibilita la comprensión de todo tipo de materiales mediante su caracterización detallada.

Desde que en el año 1930 se construyera el primer acelerador de partículas, la tecnología de este tipo de dispositvos e instalaciones no ha dejado de desarrollarse (véase la gráfica). El parámetro más evidente ha sido el incremento de las energías a las que pueden someterse las partículas. Esto es necesario, por ejemplo, para reproducir las condiciones por las que se forma la materia en los procesos de fisión atómica en las estrellas, o para descubrir los constituyentes básicos. Quarks y leptones nos serían probablemente desconocidos de no ser por los aceleradores de partículas.

El acelerador de corriente continua de Walton y Cockcroft, basado en la rectificación de corriente alterna, logró generar una energía de 260 keV, que se empleó para bombardear protones



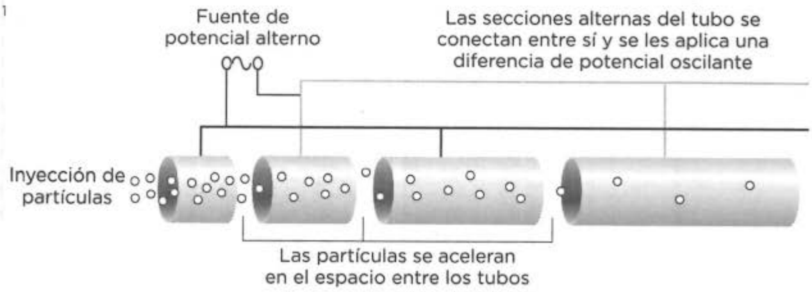
En este diagrama de Livingston se recoge la evolución de la tecnología en aceleradores de partículas, principalmente en relación con su incremento progresivo de la energía implicada.

y lanzarlos contra un blanco fijo consistente en una lámina de litio. Tras el impacto, el átomo de litio se puede escindir en dos rayos alfa.

El acelerador de Van de Graaff, creado en el Massachusetts Institute of Technology, también está basado en un fenómeno de electricidad electrostática. Se empezó a construir en 1929 y en 1933 ya estaba operativo. Emplea una correa para acumular cargas eléctricas en una esfera. En la actualidad los aceleradores de Van de Graaff siguen siendo muy populares y con ellos se han llegado a establecer diferencias de potencial de hasta 20 MeV.

El uso de corriente alterna supuso un salto cualitativo en el campo de los aceleradores de partículas. El estadounidense Luis Alvarez diseñó el famoso acelerador lineal (LINAC) en 1948 (fi-

FIG. 1

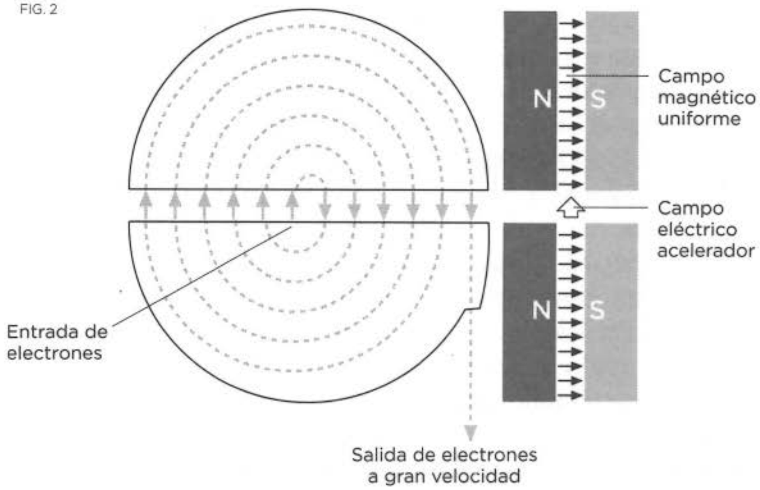


Las partículas se aceleran entre fragmento y fragmento de tubo, y al final del recorrido alcanzan una gran velocidad.

gura 1). Un acelerador lineal se basa en la siguiente estructura: una fuente de partículas cargadas, por ejemplo, un cátodo del cual se extraen las partículas que se quieren utilizar mediante la aplicación de un alto voltaje. Para dar un mayor momento (velocidad) al haz de partículas generado, se las acelera de forma incremental mediante la aplicación de campos eléctricos alternos coordinados con el paso de las partículas cargadas. El diseño del específico depende fuertemente de la naturaleza y características de las partículas, sean electrones, protones, iones..., esto es, en términos de su masa, carga, etc., y de la energía que se desee transferir al haz de partículas.

También existen aceleradores circulares: los ciclotrones (figura 2) y los sincrotrones. El primer ciclotrón fue desarrollado por el físico estadounidense Ernest Lawrence en 1932. Siete años más tarde, en 1939, este trabajo le reportaría el premio Nobel de Física, en plena competición por el desarrollo del primer acelerador de partículas. La idea en que se basó su invento consistía en acelerar las partículas mediante sucesivas interacciones de la partícula cargada con el campo magnético proveniente de un potente electroimán. La trayectoria de las partículas es de tipo arco o curvilíneo debido a la interacción con el campo magnético que se aplica y de ahí su nombre, lo que evita que se tenga que recurrir a grandes voltajes. Los ciclotrones tienen una forma de dos letras D huecas. Lawrence consiguió transferir mediante esta aproximación una energía de hasta de 1,25 MeV.

FIG. 2



Los electrones se introducen en el ciclotrón por la parte central y se les somete a un campo magnético que les obliga a trazar una trayectoria en semicírculo. Una vez completada, un campo eléctrico entre los dos semicírculos acelera linealmente los electrones hasta penetrar en el otro campo magnético inverso. Al ir adquiriendo más energía, los semicírculos descritos por los electrones son de radio mayor con cada ciclo que se completa, hasta que finalmente se extrae el haz a una velocidad muy elevada.

Los sincrotrones son similares a los ciclotrones por el hecho de que las partículas describen trayectorias curvilíneas y porque están basados en electroimanes, pero circulan en una trayectoria cerrada. La diferencia principal en los elementos que los componen estriba en las configuraciones de los campos electromagnéticos, que en el caso de los sincrotrones son muy sofisticadas, incluyendo desde los simples dipolos electromagnéticos hasta complejas configuraciones, cuadrupolares, octupolares, etc. La complejidad se ve compensada por las condiciones en que permite realizar los experimentos, la más alta energía. Como las partículas aceleradas son, por ejemplo, electrones, partículas cargadas, estas emiten una radiación electromagnética conocida como «luz sincrotrón», debido a que una trayectoria circular implica que la velocidad de la partícula varía de forma instantánea, de modo que emite radiación. Se han extraído toda clase de utilidades de esta radiación, por ejemplo médicas.

En último lugar, a partir de la década de 1960 destaca la aplicación de los sincrotrones como colisionadores; se hace circular dos partículas aceleradas en direcciones opuestas que finalmente

colisionan. Estas interaccionan e implican grandes cantidades de energía (el doble que si se acelera solo una partícula). Entre las partículas que se hacen colisionar están un electrón y un positrón, o bien dos protones. Uno de los primeros en ponerse en funcionamiento fue el SPEAR, ubicado en Stanford (Estados Unidos), y que sigue estando operativo.

Los colisionadores han conseguido grandes logros en física de partículas. Entre los más importantes se encuentra el Tevatrón en el Fermilab, en Illinois, Estados Unidos, donde se aceleran protones y antiprotones en un circuito circular que mide más de seis kilómetros. En funcionamiento desde 1987, cada partícula alcanza 0,9 TeV. En 1995 en estas instalaciones se descubrió el quark *top*.

El mayor colisionador —y el instrumento científico más grande y caro de todos los tiempos— es el gran colisionador de hadrones (LHC, por la sigla en inglés de Large Hadron Collider). Ubicado en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), cerca de Ginebra, en la frontera franco-suiza, su misión es la de permitir colisionar protones con una potencia que se cree que podrá llegar en los próximos años hasta los 7 TeV por cada protón. En abril de 2012 ya se alcanzó el récord con una colisión de hasta 8 TeV (dos haces de protones de 4 TeV circulando en sentido opuesto). Se trata de una extraordinaria herramienta de experimentación, en la que los protones se aceleran a casi la velocidad de la luz y en su colisión se estima que se reproducen algunas de las condiciones que se dieron en el Big Bang. Tras ponerse en funcionamiento en 2008 de forma fallida, reinició de nuevo su marcha regular en 2009, aunque las primeras colisiones no tuvieron lugar hasta el año siguiente. Este colisionador permitió confirmar la existencia de una partícula «consistente con el boson de Higgs», un ingrediente fundamental para entender por qué las partículas tienen masa, según el modelo estándar de la física de partículas. El descubrimiento se anunció el 4 de julio de 2012.

Lecturas recomendadas

ACZEL, A., *Las guerras del uranio*, Barcelona, RBA, 2012.

BRYSON, B., *Una breve historia de casi todo*, Barcelona, RBA, 2003.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza, 2011.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HOOFT, G., *Partículas elementales*, Barcelona, Drakontos, 2008.

KRAGH, H., *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo* XX, Madrid, Akal, 2007.

PULLMAN, B., *El átomo en la historia de la humanidad*, Barcelona, Ediciones de Intervención Cultural, 2010.

SÁNCHEZ RON, J.M., *Historia de la física cuántica*, Barcelona, Crítica, 2001.

TERESI D. Y LEDERMAN L., *La partícula divina*, Barcelona, Drakontos, 2007.

Índice